

第34回日本情報地質学会講演会

講演要旨集

Geoinforum-2023 Annual Meeting Abstracts

日 時：2023年6月22日(木)・23日(金)

会 場：岡山理科大学 50周年記念館(岡山)

主 催：日本情報地質学会

後 援：日本地質学会 情報地質専門部会

目 次

一般講演

画像処理

マルチスペクトルカメラの地熱・海底鉱物資源探査への適用可能性に関する基礎的検討	久保 大樹・岸本 将英・小池 克明	1
---	-------------------	---

リモートセンシング

機械学習を用いた可視・反射赤外スペクトルの波長選択による鉱物含有率推定精度の向上	岸本 将英・久保 大樹・小池 克明	3
赤外線画像による山岳トンネル切羽面の膨潤性粘土鉱物の含有率の推定	奥澤 康一・久保 大樹・小池 克明	5
Integration of a satellite image with geologic and topographic information for delineating geothermal potential areas in East Java Island (Indonesia)	Tedi Atmapradhana・Heru Berian Pratama・Katsuaki Koike	7

解析手法・応用

航空レーザ測量データを用いたランダムフォレストによる斜面崩壊地の判読	植田 允教・根本 達也・ベンカテッシュ ラガワン	9
LiDar を利用した調査・設計事例	樋上 広篤・立川 浩祥・佐藤 明・鏡原 聖史	11
3次元波動伝播シミュレーションを用いたコンクリートひび割れの自己治癒評価手法の検討	奥出 信博・Gerlinde Lefever・麻植 久史・塩谷 智基	13
Wavelet 変換に基づくレイリー波速度トモグラフィ法によるコンクリートダムの健全性評価	麻植 久史・塩谷 智基・小堀 俊秀・金銅 将史	15
掘削コア試料 X 線 CT 画像中の脈状鉱物の自動検出に基づく海洋地殻の浸透率構造の推定	赤松 祐哉・片山 郁夫・岡崎 啓史・道林 克禎	17
360 度カメラ撮影による点群化と橋梁の定期点検支援技術開発	小椋 紀彦・小西 雄治・福地 良彦・塩谷 智基	19
マウンド型・埋没型鉱床の両方をマッピング可能な海洋電磁探査法の開発	石須 慶一・笠谷 貴史・後藤 忠徳・小池 克明・シリポンパラポン ウィラシャイ・岩本 久則・川田 佳史・石橋 純一郎	21
鉱石試料分析データの多変量解析による日本の熱水鉱床の化学組成的特徴とその生成要因の解釈	江夏 道晴・柏谷 公希・小池 克明	23
反応輸送シミュレーションによる海底熱水鉱床の生成モデリング	富田 昇平・小池 克明・後藤 忠徳・鈴木 勝彦・笠谷 貴史	25
熱水システムのモデリングのための Physics-informed ニューラルネットワークの開発	石塚 師也・嶋 章裕・林 為人	27

データベース

「ちきゅう」の Post IODP に向けたデータベース構想	木戸 ゆかり・Adam Wspanialy・青池 寛・Sean Toczko	29
--------------------------------	--	----

GIS・Web-GIS

位置情報が付された 5 万分の 1 岡山県地質図の配布について	能美 洋介・田邊 信男・深味 義之・水野 正行・田中 元・大嶋 優斗・清水 英二	31
三次元大量点群データにおける点群 PNG の優位性	西岡 芳晴・北尾 馨	33

二次元点群展開処理手法の改良	北尾 馨	35
地層対比システムにおけるボーリングデータの可視化	櫻井 健一・米澤 剛・根本 達也・升本 眞二	37
WebGL を用いた都市地質地盤情報のボクセルモデルビューア	野々垣 進・中澤 努	39
帯水層の三次元形状可視化プログラムの開発と水理構造解析への応用	山本 駿・小池 克明・柏谷 公希・山敷 庸亮	41
種々の地殻情報の GIS 利用による日本周辺海底熱水鉱床の形成支配要因の検出	橋本 裕介・久保 大樹・小池 克明	43

地質モデリング

能登半島北東部の群発地震	石川 有三	45
海洋地質データの統合した管理について	清水 恒子・坂口 弘訓・高市 和義・高美 さゆり・片山 肇・井上 卓彦	47
北海道訓子府地域の水理地質情報	森野 祐助	49
深層学習を用いた物理探査データからの地温分布推定：数値テスト事例	山本 壮馬・後藤 忠徳	51

ポスター発表

5 万分の 1 岡山県地質図データベース更新の試みー更新統 ”山砂利層” から古第三系吉備層群へー	田中 元・田邊 信男・大嶋 優斗・鈴木 茂之・能美 洋介	53
情報地球学におけるソーシャルメディアコンテンツと 3D-Movie の裸眼立体視 Web アプリケーションによる利活用	領木 邦浩	55
キュリー点深度推定における区分線形関数を用いたノイズ除去アルゴリズムの実装	上田 大輝・根本 達也・ベンカテッシュ ラガワン	57
iRIC-ELIMO および Nay2DFlood ソルバーを使用した津波浸水シミュレーション：宮城県北上川の事例	末安 史弥・根本 達也・ベンカテッシュ ラガワン	59
マルチエージェントシステムによる津波避難シミュレーション	根本 達也・佐藤 葵・ベンカテッシュ ラガワン	61

CONTENTS

General session

Image Processing

- Fundamental examination on applicability of multispectral camera to exploration of geothermal and seafloor metal resources
..... Taiki Kubo, Masahide Kishimoto and Katsuaki Koike 1

Remote sensing

- Accuracy improvement of mineral composition by wavelength selection from visible-reflected infrared spectrum using machine learning Masahide Kishimoto, Taiki Kubo and Katsuaki Koike 3
- Estimation of content ratio of swelling clay minerals on mountain tunnel face through infrared image
..... Koichi Okuzawa, Taiki Kubo and Katsuaki Koike 5
- Integration of a satellite image with geologic and topographic information for delineating geothermal potential areas in East Java Island (Indonesia) Tedi Atmapradhana, Heru Berian Pratama and Katsuaki Koike 7

Data analyses and applications

- Identification of slope failure sites applying random forest classification to LiDAR data
..... Mitsunori Ueda, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan 9
- Survey and civil design examples using LiDar
..... Hiroshige Higami, Hiroyoshi Tachikawa, Akira Satou and Satoshi Kagamihara 11
- Evaluation method of self-healing state on concrete cracks using three-dimensional wave propagation simulation
..... Nobuhiro Okude, Gerlinde Lefever, Hisafumi Asaue and Tomoki Shiotani 13
- Soundness evaluation of concrete dam using Rayleigh wave tomography method based on wavelet transform
..... Hisafumi Asaue, Tomoki Shiotani, Toshihide Kobori and Masashi Kondo 15
- Paleo-permeability structure of oceanic crust based on automated detection of veins in X-ray CT core images
..... Yuya Akamatsu, Ikuo Katayama, Keishi Okazaki and Katsuyoshi Michibayashi 17
- Point grouping by 360-degree camera shooting and development of technology to support periodic inspection of bridges
..... Norihiko Ogura, Yuji Konishi, Yoshihiko Fukuchi and Tomoki Shiotani 19
- Development of a marine controlled-source electromagnetic method capable of mapping both mound and blind ore bodies
..... Keiichi Ishizu, Takafumi Kasaya, Tada-nori Goto, Katsuaki Koike, Weerachai Siripunvaraporn,
Hisanori Iwamoto, Yoshifumi Kawada and Jun-ichiro Ishibashi 21
- Chemical composition features of hydrothermal deposits in Japan through multivariate analysis of ore sample data and interpretation of their generation factors Michiharu Enatsu, Koki Kashiwaya and Katsuaki Koike 23
- Generation modeling of seafloor hydrothermal deposit through reactive transport simulation
..... Shohei Albert Tomita, Katsuaki Koike, Tada-nori Goto, Katsuhiko Suzuki and Takafumi Kasaya 25
- Development of a physics-informed neural network for modeling of hydrothermal systems
..... Kazuya Ishitsuka, Akihiro Shima and Weiren Lin 27

Database

- New database plan for “Chikyu” for Post IODP Yukari Kido, Adam Wspanialy, Kan Aoike and Sean Toczko 29

GIS•Web-GIS

- Distribution of 1:50,000 Okayama Prefecture Geological Maps with location information
..... Yousuke Noumi, Nobuo Tanabe, Yoshiyuki Fukami, Masayuki Mizuno, Hajime Tanaka, Yuto Oshima and Eiji Shimizu 31

Advantages of Point Cloud PNG in 3D massive point cloud data	Yoshiharu Nishioka and Kaoru Kitao	33
Improvement of processing method for 2D point cloud mapping	Kaoru Kitao	35
Visualization of borehole data for correlation system of strata		
.....	Kenichi Sakurai, Go Yonezawa, Tatsuya Nemoto and Shinji Masumoto	37
Voxel model viewer for geological information in urban area using WebGL	Susumu Nonogaki and Tsutomu Nakazawa	39
Program development of three-dimensional visualization of aquifer shape with application to hydraulic structure analysis		
.....	Shun Yamamoto, Katsuaki Koike, Koki Kashiwaya and Yosuke Alexandre Yamashiki	41
Detection of control factors on generation of seafloor hydrothermal deposits around Japan through GIS application of multiple crustal information	Yosuke Hashimoto, Taiki Kubo and Katsuaki Koike	43

Geologic modeling

Earthquake swarm in Noto peninsular	Yuzo Ishikawa	45
Integrated management of marine geological data		
.....	Hisako Shimizu, Hironori Sakaguchi, Kazuyoshi Takaichi, Sayuri Takami, Hajime Katayama and Takahiko Inoue	47
Hydrogeological information on the Kunneppu area, Hokkaido	Yosuke Morino	49
Subsurface temperature distribution inferred from geophysical exploration data using deep learning: Numerical tests		
.....	Soma Yamamoto and Tada-nori Goto	51

Poster session

Attempt to update 1:50,000 Okayama Prefecture Geological Map Database — From the Pleistocene "mountain gravels" to the Paleogene Kibi Group —		
.....	Hajime Tanaka, Nobuo Tanabe, Yuto Oshima, Shigeyuki Suzuki and Yousuke Noumi	53
Utilization of social media contents and 3D-movies in information geology with stereoscopic web application		
.....	Kunihiro Ryoki	55
Implementation of denoising algorithm for Curie point depth estimation using piecewise linear function		
.....	Daiki Ueda, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	57
Simulation of tsunami inundation using iRIC-ELIMO and Nay2DFlood solvers: Case study of Kitakami River, Miyagi Prefecture	Fumiya Sueyasu, Tatsuya Nemoto and Venkatesh Raghavan	59
Tsunami evacuation simulation using multi-agent system	Tatsuya Nemoto, Aoi Sato and Venkatesh Raghavan	61

マルチスペクトルカメラの地熱・海底鉱物資源探査への適用可能性に関する基礎的検討

久保 大樹*・岸本 将英*・小池 克明*

Fundamental examination on applicability of multispectral camera to exploration of geothermal and seafloor metal resources

Taiki Kubo*, Masahide Kishimoto* and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail: kubo.taiki.3n@kyoto-u.ac.jp (Kubo)

キーワード: マルチバンド, 非破壊検査, リモートセンシング, 海底熱水鉱床, 衛星画像
Key words: Multi band, Nondestructive inspection, Remote sensing, Seafloor hydrothermal deposit, Satellite imagery

1. はじめに

人間の可視域以上の長波長帯である赤外域の反射を利用した非破壊・非接触検査は、医療や食品衛生の分野で積極的に導入が進められている(例えば亀岡・橋本, 2003)。その中でもマルチスペクトルカメラによる画像分析は、結果を視覚的に理解しやすいこともあり、特に注目を集めている。赤外域での反射を利用した装置は、地質調査や資源探査においても利用の検討が進められているが、いまだ普及しているとは言えない状況にある。その原因のひとつとしては、対象とする土壌や岩石の構造が複雑であることや、安定した撮影環境を確保するのが難しいことが挙げられる。しかしながら、地表面における反射スペクトルを利用した衛星画像解析は、長らく地質調査や資源探査に用いられてきた技術であり、これまでに蓄積された知見を活用することが可能である。また、近年発達が著しい機械学習の利用も、複雑な対象物を解釈する解析手法開発の一助となりえる。そこで本研究では、地熱・海底鉱物資源探査への応用を例として、マルチスペクトルカメラの適用性の検討を行い、その基礎的な課題点とその解決策について議論する。

2. 測定装置と解析手法

スペクトルカメラは一般的な光学式カメラ(RGB カメラ)と同様に撮影対象表面からの電磁波の反射を捉え、画像として記録することができる。しかし、RGB カメラと異なり、複数の波長帯を個別に記録することが可能なため、多次元的なデータとみなすことができる。装置によって記録可能な波長帯(バンド)の数が異なり、一般には10バンド程度までのものがマルチスペクトルカメラ、それ以上のものがハイパースペクトルカメラと呼ばれる。また、撮影可能な波長の範囲も異なり、1000 nm 程度の近赤外域までを扱う装置と、それ以上の短波長赤外を扱うことができる装置で、価格は数倍から数十倍近くの差が生じる。本研究では、mcCAM (Spectral Device 社)と MonarchII (Unispectral 社)の2種類のマルチスペクトルカメラを使用した(第1図)。いずれも近赤外域(700~1000 nm)の波長域でそれぞれ4バンド、10バンドの撮影が可能な装置である。市販価格は、専用の撮影ソフトウェア込みで50~100万円程度となっている。それぞれ

の基本的な仕様を第1表にまとめる。撮影にあたっては、屋外の場合は太陽光のみを、屋内の場合は分光分布が近赤外域まで及ぶハロゲンランプを使用した。一般的なLED照明の分光分布は可視域のみであるため、暗室の利用などは行っていない。解析にあたっては、異なるバンドの画像を重ね合わせ、その輝度値の比や差分を求めることで、対象の反射・吸収特性を強調する作業を行う。このとき、光源やカメラのセンサが波長ごとに異なる分光特性を持つことに注意が必要である。この影響を軽減するために、撮影時には反射率が既知の標準反射板を画像内に配置し、その輝度に基づいた補正を行った。

また、マルチスペクトルカメラによって撮影された画像の検証のため、高い波長分解能を持つプローブ型分光光度計 ASD FieldSpec4 (Malvern Panalytical 社: 以下 FieldSpec)を使用し比較を行った。FieldSpec は350~2500 nm の範囲の反射強度を1 nm ごとに求めることが可能である。



第1図 撮影に使用したマルチスペクトルカメラ (左: mcCAM: Spectral Device 社, 右: MonarchII: Unispectral 社)

第1表 マルチスペクトルカメラ2機種の仕様

	mcCAM	MonarchII
バンド数	4	10
(波長帯 nm)	(730 - 930)	(713 - 920)
解像度	512 × 512	1284 × 1024
撮影方式	同時撮影	切り替え式
画像形式	動画+スナップショット	スナップショット

3. 測定結果

3.1 地熱地域における植生の撮影と分析

地熱地域においては、深部から上昇する地熱流体による土壌の変質や温度変化が植生の生育状況に影響し、葉部での反射スペクトルが変化することが報告されている(Coolbaugh et al., 2006). また、植生のストレスは Red edge と呼ばれる 700 nm 付近の波長帯に強く表れることが知られており、前述したマルチスペクトルカメラの撮影可能範囲とよく対応している。

マルチスペクトルカメラによる植生スペクトル変化の検出可能性を検証するため、鹿児島県指宿地域において、植生の撮影と解析を行った。撮影には MonarchII を使用し、十分な光量が確保できる環境で実施した。第 2 図に一例として、噴気帯(湯峯神社)付近で撮影された画像と 10 バンドでの反射スペクトルを示す。反射スペクトルは、バンドの中心波長を代表波長とし、同じ位置の葉部のピクセル値を抽出している。第 2 図(右)に示すように、700~800 nm 付近での反射率の急増が見られ、これは植生の一般的なパターンと一致する。一方で、850 nm 付近からの急減は一般的には見られない特異なパターンであるが、本地域の衛星画像(Hyperion)から取得された地熱兆候点周辺のスペクトルとはよく対応している。よって、今回のスペクトルカメラで取得された反射スペクトルの特徴は、地熱地域特有の植生スペクトルを適切に反映していると考えられる。以上の結果から、スペクトルカメラによる現地測定データと衛星画像解析による広域解析結果を組み合わせることにより、詳細な地熱の影響範囲のマッピングや広域調査結果の改善が期待される。

3.2 海底熱水鉱床サンプルの撮影と分析

mcCAM を使用して、中部沖縄トラフの熱水噴出域から採取されたサンプルの測定を行った。屋内でハロゲンランプを光源とし、反射板を用いた補正を適用した。また、撮影画像と比較するため、第 3 図に示すように 2 サンプル(#79, #84)の特徴的な箇所において FieldSpec による分光測定と XRF(蛍光 X 線分析装置)による元素濃度測定を実施した。FieldSpec による測定結果から、サンプル#79 は 730 nm と 865 nm、サンプル#84 は 730 nm と 930 nm で最も反射率の差が大きくなることが確認されたため、これらの比を求めることで反射率分布の強調処理を行った。第 4 図に示すように、バンド比をとることで#79 の塊状の鉱物や、#84 の茶褐色の脈が明瞭に現れている。また、第 3 図に示した各点での XRF による元素濃度測定結果(第 5 図)と比較すると、#79 では Si 濃度との負の相関、#84 では Zn との正の相関が確認された。特に#84 のバンド比との相関は明瞭であり、スペクトルカメラ画像の解析による金属鉱物含有量の迅速な評価手法の開発が期待できる。

4. まとめと今後の課題

スペクトルカメラの資源探査への適用可能性を検証するために、比較的低価格な 2 機種を使用し、地熱地域での植生と海底熱水鉱床サンプルの撮影とスペクトルの分析を行った。どちらの結果からも、衛星リモートセンシングや XRF 分析などと組み合わせることによって、迅速かつ簡便な測定手法として資源探査に活用できる可能性が示された。しかしながら、装置ごとの特性や環境に合わせた事前の検証作業や調整が必要であり、多様な現場で使用するにはいまだ多くの課題を残している。今後は、様々な場面での実施例を蓄積することで、適用可能範囲や精度についての検証を行い、再現性のある結果を得るための測定手法の確立が求

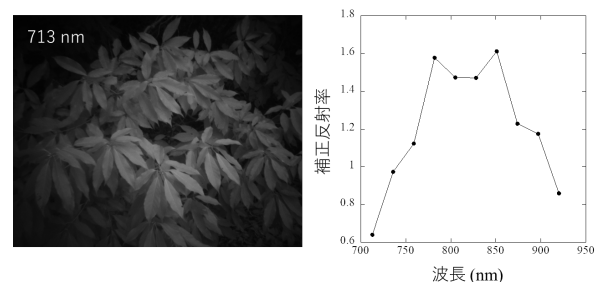
められる。

謝辞：本研究は JSPS 科研費若手研究(22K14105)、および一般社団法人資源・素材学会 学会長期テーマプロジェクト (PJ) による成果である。

文献

亀岡孝治, 橋本篤 (2003) 農産物・食品の赤外分光分析とその応用. 農業情報研究, vol. 12, pp. 167-188.

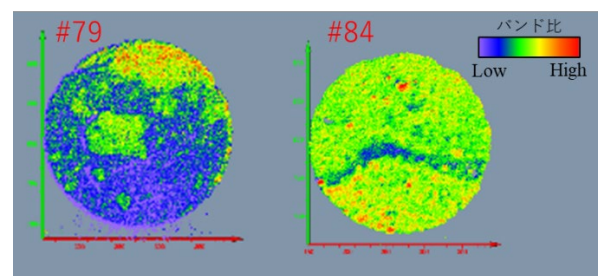
Coolbaugh, M. F., Kratt, C., Fallacaro, A., Calvin, W. M. and Taranik, J. V. (2007) Detection of geothermal anomalies using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA. *Remote sensing of Environment*, vol. 106, pp. 350-359.



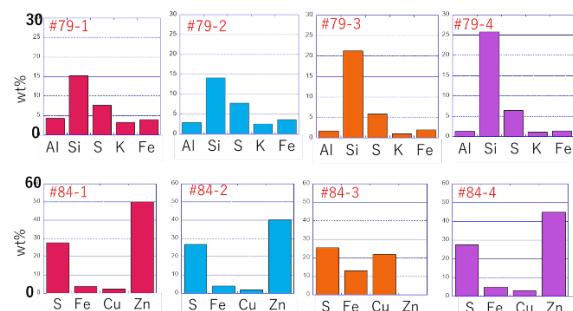
第 2 図 スペクトルカメラによる噴気帯付近の植生写真(左)と反射スペクトル(右)



第 3 図 海底熱水鉱床 2 サンプルと各測定ポイント



第 4 図 2 バンドでの反射率比をとった画像(#79 は 730 nm / 865 nm、#84 は 730 nm / 930 nm)



第 5 図 XRF による元素濃度測定結果 (測点は第 3 図に対応している)

機械学習を用いた可視・反射赤外スペクトルの 波長選択による鉱物含有率推定精度の向上

岸本 将英*・久保 大樹*・小池 克明*

Accuracy improvement of mineral composition by wavelength selection from visible-reflected infrared spectrum using machine learning

Masahide Kishimoto*, Taiki Kubo* and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: kishimoto.masahide.75z@st.kyoto-u.ac.jp (Kishimoto)

キーワード： リモートセンシング、スペクトル分解、バンド選択、機械学習、特徴量選択

Key words: Remote sensing, Spectral unmixing, Band selection, Machine learning, Feature selection

1. はじめに

地球観測衛星を利用したリモートセンシング画像は、金属鉱床や熱水変質鉱物を広域から検出できるように、兆候検出として広く利用されている。ハイパースペクトル画像では観測波長帯(バンド数)が多く、得られる情報量も多いため、地表物質の識別精度も高いといわれている。しかしながらこれらのデータには相関性が高く無関係な情報も含まれているため、解析において障害となる場合がある。この問題の解決手法として主成分分析(Principal Component Analysis: PCA)を代表とする特徴量抽出や機械学習で用いられる特徴量選択(バンド選択)といった次元削減が行われる。リモートセンシング画像解析の一つである地表面鉱物含有率推定においてバンド選択が行われる例は少なく、より詳細な評価が必要である。

また地球観測衛星によって撮影されたリモートセンシング画像において、ハイパースペクトル衛星画像が取得されている領域はマルチスペクトル衛星画像が取得されている領域と比較してはるかに少ない。バンド選択による地表面鉱物含有率推定の検証によってマルチスペクトル衛星画像が取得されている領域規模での高精度解析が期待される。

そこで本研究では、バンド選択による鉱物含有率推定精度の検証を目的として、スペクトルライブラリーデータの解析によって得られた選択バンドによってハイパースペクトル画像解析を行い、鉱物含有率推定結果と実際の鉱物含有率推定分布図との比較を行った。

2. 測定地域とデータの概要

本研究では、米国ネバダ州中部の Cuprite 地域を対象とした(第1図)。Cuprite 地域周辺は、特に乾燥した気候で植生が疎な砂漠地帯になっており、金銀銅を含む重要な鉱物の分布が知られている。Cuprite の表層地層は、カンブリア紀から第三紀までの様々な岩石からなり、その中でも明礬石やカオリナイトが分布する熱水変質帯が広範囲におよぶ (Hoang and Koike, 2017)。解析領域は東西 6.99 km、南北 7.78 km で、明礬石、白雲母、カオリナイト、石灰岩が

主に分布している。本研究ではこの四種類の鉱物を対象とし、バンド選択および地表面鉱物含有率推定の端成分に用いた。

解析には衛星搭載型ハイパースペクトルセンサ Hyperion により撮影された衛星画像を用いた。Hyperion は波長分解能が高く、356~2577 nm の波長域に 242 もの連続するバンドを有する。解析で用いたシーンは、2011 年 9 月 19 日に撮影されており、雲量は 0% である。

本研究ではバンド選択における使用データおよび鉱物含有率推定における端成分として米国地質調査所(United States Geological Survey: USGS)のスペクトルライブラリーを用いた。USGS のスペクトルライブラリーは、広く認知されているライブラリーで実験室において分光光度計によって得られた天然および人工物質のスペクトルから構成されている。同一鉱物について複数の反射スペクトルが収録されており、本研究では 400~2500 nm の範囲で幅 1 nm の resample を行い、データとした。端成分として用いる際には各鉱物の反射スペクトルの平均値を用いた。

3. 解析手法

3.1 スペクトルライブラリーからのバンド選択

本研究ではバンド選択手法として連続体除去



第1図 Cuprite 地区の位置(左), Cuprite 地区の一般的な表面状態と Alunite hill(右)

(Continuum Removal: CR)を施した USGS のスペクトルライブラリデータに対し、機械学習で用いられる特徴量選択手法を応用した。機械学習で用いられる特徴量選択は Filter methods, Wrapper methods, Embedded methods の3つに大別される(Chandrashekar and Sahin, 2014)。本研究では機械学習モデルを使用せずにデータセットのみで完結する手法である Filter methods の一つに着目し、特徴量分布図から選択波長を決定した(第2図)。本研究では選択波長数を10と設定した。

3.2 ハイパースペクトル・マルチスペクトル画像解析

大気補正、不良バンド除去およびノイズ除去を含む前処理を施したスペクトル画像(バンド選択なし:155バンド, バンド選択あり:10バンド)に対し鉱物含有率推定を行った。本研究では一般的に鉱物含有率推定手法として用いられる線形分離(Linear Spectral Unmixing: LSU)のほかに、連続体除去を前処理として行った後に LSU を行う CR モデル, 自然対数除去に加えて連続体除去を前処理として行った後に LSU を行う LCR(Log Continuum Removal: Zhao, 2019) モデル, および反射スペクトルが地形や粒径によって乗法的に変化すると仮定し, その影響を変数として考慮した SCLSU(Scaled Constrained Least Squares Unmixing: Ibarrola-Ulzurru, et al., 2019)を適用した。

4. 含有率推定結果および考察

Hyperion 画像の全データ(155バンド)を用いた解析では, 地表で確認されているカオリナイトの存在を判別することができなかった。一方, 特徴量分布を基準にハイパースペクトルデータからバンド選択を行ったマルチスペクトルデータでは, SCLSU, LCR モデル, CR モデルにおいてカオリナイトの含有率を測定することができた。LCR モデルにおける比較を第4図に示す。LCR モデルでは明礬石, 方解石, 白雲母においても含有率推定を行うことが可能であり, これらの鉱物が推定された位置は, 第3図に示す USGS の鉱物分布図(Kruse, et al., 2015)とも整合的であった。以上の結果からバンド選択により含有率推定精度がバンド選択を行っていない場合と比較して同等以上であることが示された。含有率推定精度が向上した原因として, ミクセル内における端成分ではない物質のスペクトル吸収ピークによるスペクトル分離アルゴリズムへの影響の軽減が考えられる。

5. まとめと今後の課題

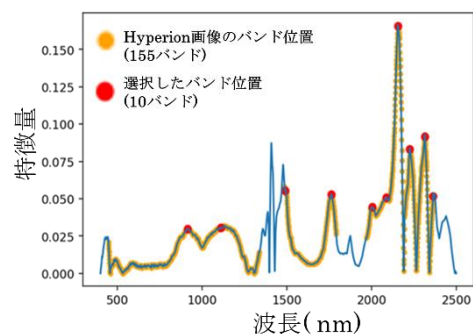
本研究ではバンド選択による鉱物含有率推定精度の検証を目的として, スペクトルライブラリデータの解析によって得られた選択バンドによってハイパースペクトル画像解析を行った。LCR モデルではバンド選択を行ったことで高精度な解析を行うことができると考えられる結果となった。本研究では特徴量分布図からピーク位置に対する波長を選択したが, バンド幅やバンド数をどのように設定するかについては, さらなる検証が必要である。

文 献

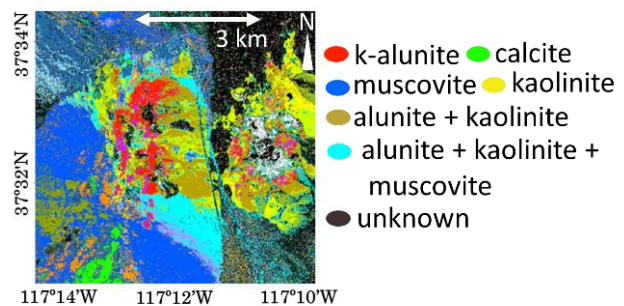
- Chandrashekar, G., Sahin, F. (2014) A survey on feature selection methods. *Computers and Electrical Engineering*, vol.40, no.1, pp. 16-28.
- Hoang, N. T., Koike, K. (2017) Transformation of Landsat imagery into pseudo-hyperspectral imagery by a multiple regression-based model with application to metal deposit-related minerals mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,

vol.133, pp.157-173.

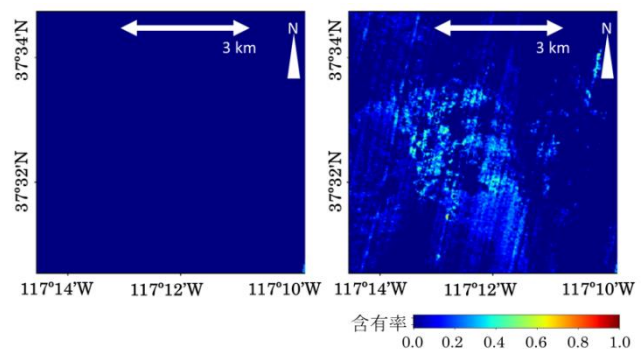
- Ibarrola-Ulzurrun, E., Drumetz, L., Marcello, J., Gonzalo-Martín, C., Chanussot, J. (2019) Hyperspectral Classification Through Unmixing Abundance Maps Addressing Spectral Variability. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 7, pp. 4775–4788.
- Kruse, F. A., Baugh, W. M., Perry, S. L. (2015) Validation of DigitalGlobe WorldView-3 Earth imaging satellite shortwave infrared bands for mineral mapping. *Journal of Applied Remote Sensing*, vol.9, no.1, pp.1-17.
- Zhao, H. (2019) Nonlinear unmixing of minerals based on the log and continuum removal model. *European Journal of Remote Sensing*, vol.52, no. 1, pp.277-293.



第2図 スペクトルライブラリデータから得られた特徴量分布図と選択バンド



第3図 本研究の解析領域における地表鉱物分布 (Kruse, et al. (2015)より編集)



第4図 LCRモデルによる解析領域におけるカオリナイトの地表面鉱物含有率推定結果: バンド選択なしの場合(右)とバンド選択ありの場合(左)の比較

赤外線画像による山岳トンネル切羽面の膨潤性粘土鉱物の含有率の推定

奥澤康一*・久保大樹**・小池克明**

Estimation of Content Ratio of Swelling Clay Minerals on Mountain Tunnel Face Through Infrared Image

Koichi OKUZAWA*, Taiki KUBO and Katsuaki KOIKE **

* 大林組技術研究所 Technology Research Institute, Obayashi Corporation, 640 Shimokiyoto 4-chome, Kiyose City, Tokyo 204-8558, Japan. E-mail: okuzawa.koichi@obayashi.co.jp
** 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan.

キーワード：山岳トンネル切羽，スメクタイト，赤外線画像，反射率，バンド比
Key words：mountain tunnel face, smectite, infrared image, reflectance, band ratio

1. はじめに

膨潤性粘土鉱物が土壌や岩石に含まれている場所で工事を行った場合、盤膨れや構造物の変形といった被害が発生することがある。膨潤性粘土鉱物の含有率は、一般に試料を採取して X 線回折分析やメチレンブルー吸着量試験等を実施して測定されるが、手間や時間がかかる。また、膨潤性粘土鉱物の分布は不均質であることが多く、少数の試料の分析では膨潤性粘土鉱物を含む地山を見落とす可能性がある。特に山岳トンネルの施工では、全線にわたっての事前調査が難しいことが多く、膨潤性粘土鉱物を原因とした盤膨れや押し出しが、施工中や供用開始後に発生している。そのため、施工時に膨潤性粘土鉱物の有無を簡便に判別する手法が求められている。

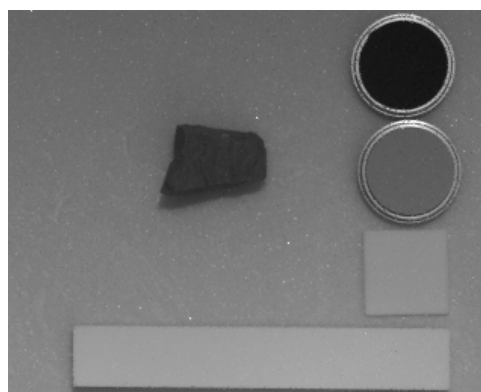
そこで筆者らは、盤膨れ等の原因となる膨潤性粘土鉱物の含有率を非接触で面的かつ迅速に計測する手法として、赤外線画像による評価手法の開発を行っている。膨潤性粘土鉱物の一つであるモンモリロナイトと膨潤しない鉱物を混ぜ合わせた模擬試料の反射スペクトルをスペクトルメーターにて測定した結果、モンモリロナイトが吸収する波長と吸収しない波長の赤外線反射率の比（赤外線反射率比）を用いることで、赤外線画像から粘土鉱物含有率を評価できる可能性が示された（奥澤ほか，2020）。さらに、岩石試料の赤外線反射率比と、試料に含まれるスメクタイトの含有率や含水比に負の相関があることを見出した（奥澤ほか，2023）。本報告では、膨潤性粘土鉱物の含有率を面的に推定する方法として赤外線カメラを使用し、膨潤性粘土鉱物を含む山岳トンネル切羽面を対象に、膨潤性粘土鉱物含有率と赤外線反射率比の関係を検討した結果について述べる。

2. 岩石試料の検討

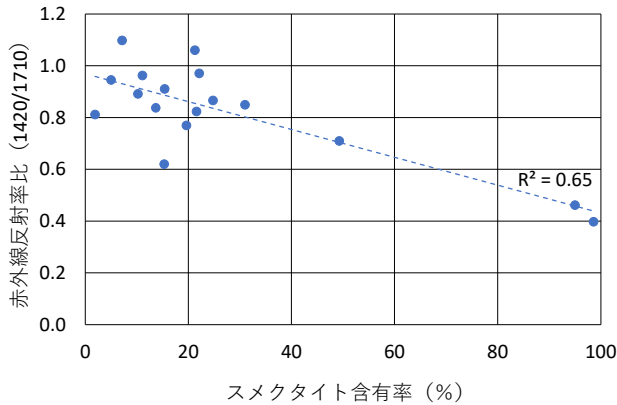
岩石試料を対象に赤外線カメラを用いて検討を行った。対象としたのは膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトを含む凝灰岩、安山岩、玄武岩である。これらの岩石は熱水変質作用を受けており、X 線回折分析の結果、スメクタイトを 1~96% 含んでいる。

これらの岩石試料を波長 1000~2350 nm の赤外線に感度を持つ赤外線カメラにて撮影した。赤外線カメラには、バンドパスフィルターを装着して特定の波長帯のみを撮影するようにした。赤外線光源にはハロゲンランプを使用した。バンドパスフィルターとして、モンモリロナイトが吸収する波長 1420, 1900, 2210, 2347 nm の赤外線を透過するもの、吸収しない波長として、波長 1116, 1710 nm の赤外線を透過するものの計 6 枚を用意した。各バンドパスフィルターの透過率や半値幅が異なっているため、試料と同時に反射率が既知である反射板を複数撮影した。撮影した赤外線画像の例を第 1 図に示す。

反射率が既知の複数の反射板の輝度から、反射率を求めるための相関式を画像ごとに取得した。岩石試料を代表していると思われる 3 点を画像の中から選定し、相関式から各点における赤外線反射率を求め、それらの平均を当該試料の赤外線反射率とした。得られた赤外線反射率から、スメクタイトが吸収する波長の赤外線反射率を、スメクタイトが吸収しない波長の赤外線反射率で除した赤外線反射率比を求めた。得られた結果の例を第 2 図に示す。最も相関が



第 1 図 岩石試料の赤外線画像の例
(波長 1420 nm. 中央が大きさ約 6cm の試料、右側上から反射率がおおよそ 2%、50%、80%、100%の反射板)



第 2 図 熱水変質を受けた岩石試料の赤外線反射率比とスメクタイト含有率の例 (バンド比 1420 nm/1710 nm)

強かった 1420 nm/1710 nm の場合で、決定係数 0.65 の負の相関が得られた。

3. トンネル切羽面での検討結果

奥澤ほか (2023) で検討したトンネル切羽のスメクタイト含有率は 76~95% とほぼ飽和状態に近く、切羽面ではほぼ完全に赤外線が吸収されてしまったため、他のトンネルにて再度撮影を行った。撮影を行ったトンネル切羽面の地質は熱水変質を受けた安山岩である。トンネル切羽面には安全上近づけないため、同一地点の掘削ズリを 3 試料採取して X 線回折分析を行ったところ、スメクタイトが 1.0~18.5%、イライト-スメクタイト混合層鉱物が 12.6~37.2% 含まれていた。ただし、これらの鉱物の回折角のピークは重なっていることから、測定の精度は低い。スメクタイトとイライト-スメクタイト混合層鉱物の合計は、31.1~38.2% であった。

撮影に使用したバンドパスフィルターは、岩石試料と同じ 6 枚である。反射率校正用の反射板は、反射率 80% 程度のもので 2% 程度のものの 2 枚とした。赤外線光源にはハロゲンランプを使用した。トンネル切羽面の可視画像を第 3 図に、赤外線画像の例を第 4 図に示す。

得られた赤外線画像について、反射率が既知な反射板の輝度を基準として各ピクセルの赤外線反射率分布を求めた。得られた赤外線反射率分布について、スメクタイトが吸収する波長の赤外線反射率を、スメクタイトが吸収しない波長の赤外線反射率で除した赤外線反射率比をピクセルごとに求めた。トンネル切羽面の赤外線反射率比分布の例を第 5 図に示す。

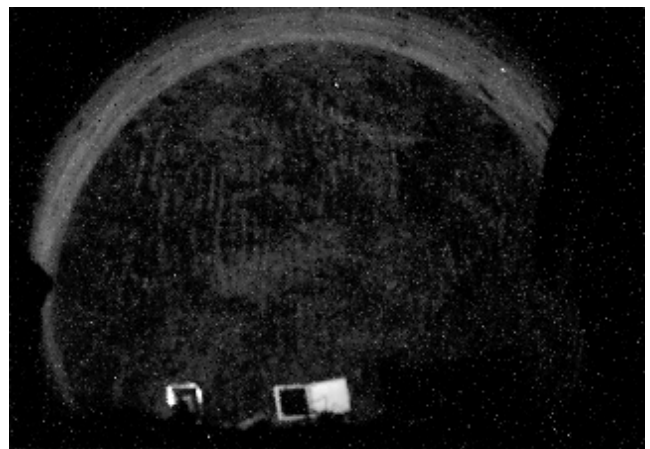
第 5 図を見ると、吹付コンクリートのうち赤外線が照射されている領域はほぼ一様に緑色を示し、反射率比 1 前後となっている。一方切羽面では、特に切羽面の右側に青色が集中している部分が認められ、切羽中央には緑~赤の反射率比の高い領域が認められた。これらは切羽面内の膨潤性粘土鉱物や含水比の高い領域、低い領域を示している可能性があると考えられる。

4. まとめ

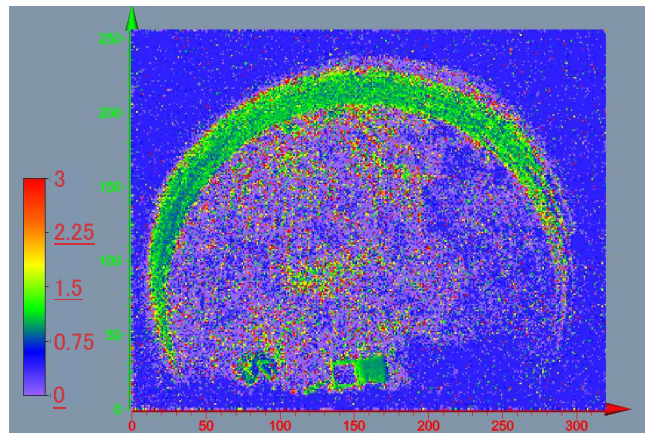
本研究の試みにより、赤外線画像からトンネル切羽の粘土鉱物の含有量の分布を、ある程度の精度をもって推定できる可能性が高いことがわかった。今後は、インバート部やボーリングコアなど、人が直接試料を採取できる場所での撮影を行い、赤外線反射率と膨潤性粘土鉱物や含水比との関係を検討していく予定である。



第 3 図 トンネル切羽面の可視画像



第 4 図 赤外線画像の例 (波長 1116 nm)



第 5 図 赤外線反射率比分布の例 (バンド比 1420 nm/1710 nm)

文 献

- 奥澤康一・久保大樹・小池克明 (2020) 赤外線画像を用いた膨潤性粘土鉱物の含有割合評価の試み. 土木学会第 75 回 年次学術講演会講演概要集, III-51.
奥澤康一・久保大樹・小池克明 (2023) 赤外線画像による岩石中の膨潤性粘土鉱物の含有率評価. 第 49 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.237-240.

Integration of a satellite image with geologic and topographic information for delineating geothermal potential areas in East Java Island (Indonesia)

Tedi Atmapradhana*, Heru Berian Pratama* and Katsuaki Koike*

*Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2,
Kyoto 615-8540, Japan.

E-mail: tedi.atmapradhana.83a@st.kyoto-u.ac.jp

Key words: Land cover, Digital Elevation Model, Geothermal, Landsat-8 image

1. Introduction

Indonesia's unique location at the convergence of multiple tectonic plates has made it a prime candidate for geothermal energy utilization, with a total geothermal potential estimated at 28,910 mW, drawn from 312 fields across several islands (Pambudi, 2018). Surface manifestations such as hot springs, mud pools, hydrothermal alteration, fumaroles, and sinter silica indicate potential geothermal energy sources. These manifestations reveal higher temperatures than their surrounding environments, making them easily identified as anomalies. The main objective of this research project is to identify the thermal anomalies and utilize the Landsat 8 OLI/TIRS imagery to identify areas with geothermal manifestations as indicators of geothermal activity in East Java Indonesia. Combining TIR (Thermal Infrared) remote sensing with geological analysis and understanding geothermal mechanisms is an accurate and efficient approach to geothermal area detection (Qin et al., 2011). The main reason for this study is to assist and support the Indonesian government's efforts to optimize the utilization of geothermal energy, especially for electricity generation of 7,242 mW by 2025.

2. Study Area and Methodology

2.1. Study area and data

This research focuses on the province of East Java as its study area. It is geographically located between 111°0' - 114°4' East Longitude and 7°12' - 8°48' South Latitude and has an area of approximately 48,040 Km² (Figure 1). In general, East Java can be divided into two main parts, namely mainland East Java with a larger proportion of almost 90% of the entire area of East Java Province, and the Madura Islands area which is only about 10%. The province has the largest installed power generation capacity in Indonesia with a total of 10,572 mW or 14.5% of the power generation in Indonesia (Sidik and Harmoko, 2022). The datasets used in this method are multisensor image data from Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS), geological data, and digital elevation model (DEM) data.

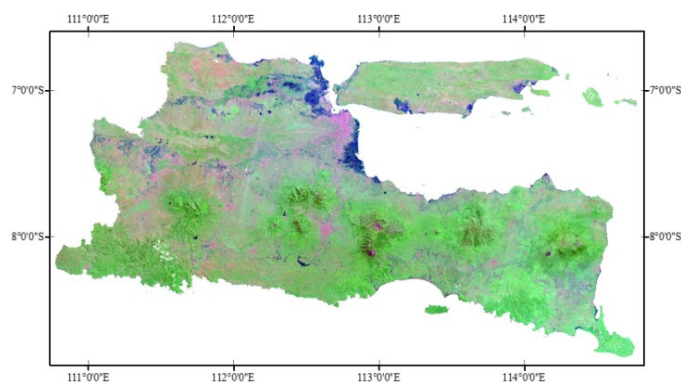


Figure 1. Landsat-8 image covering the study area

2.2. Methodology

The analysis of the study area's land cover, vegetation density, and land surface temperature (LST) relied on data obtained from the Landsat 8 satellite. The land cover was determined by subjecting the satellite image to a classification process, which utilized a supervised method employing a support vector machine module. To assess vegetation density, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) algorithm was applied. This algorithm calculates the index by comparing the near-infrared and red bands of the satellite image, enabling the quantification of vegetation density based on the variation between these spectral bands.

Furthermore, the land surface temperature map was generated using specific algorithms, namely the LST algorithm and the LSE (Land Surface Emissivity) algorithm, the researchers were able to detect temperature anomalies that may indicate the presence of geothermal energy. These algorithms utilized the thermal information extracted from band 10 and band 11 of the satellite image, however, not all of these anomalies are indicators of geothermal energy. The above research flow is summarized in Figure 2.

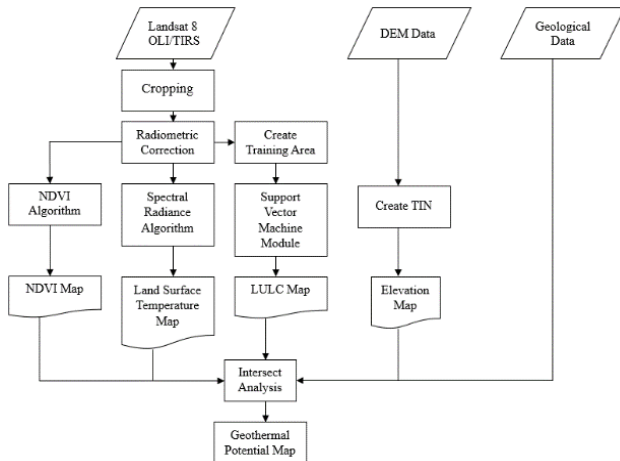


Figure 2. Research flowchart to investigate the geothermal potential area.

3. Results and Discussion

The collected data were processed into thematic maps with the projection system Universal Transverse Mercator (UTM) zone 49S. Geothermal potential zone maps were delineated by employing a combination of key factors and data overlays. These factors include land use and land cover (LULC), land elevation, normalized difference vegetation index (NDVI), and land surface temperature (LST). By integrating these datasets, along with the combination of fault line data, lineament density, and geothermal manifestation locations, comprehensive geothermal potential zone maps were generated as shown in Figure 3.

Based on generated geothermal potential zone map reveals a distinct pattern of geothermal manifestations predominantly clustered in mountainous regions. Notable locations exhibiting geothermal activity include Mt Lawu, Mt Arjuno, Mt Pandan, Mt Argopuro, and Mt Wilis. These mountainous areas emerge as hotspots of geothermal potential, suggesting favorable conditions for geothermal resources exploration and development. Furthermore, a closer examination of the density pattern of fault lines indicates a high likelihood of encountering

geothermal manifestations in the southwestern part of East Java Province. The similarities in fault formations between this region and the northwest area, as well as around Mt Arjuno-Welirang, further support the prospects of significant geothermal resources in these areas. These findings provide valuable guidance for future geothermal exploration efforts, highlighting specific regions within East Java Province that hold promising prospects for future geothermal energy development.

4. Summary

Even though TIR remote sensing is undoubtedly a valuable tool, it does possess certain limitations when it comes to geothermal resource exploration and monitoring. Consequently, relying exclusively on TIR remote sensing would prove inadequate for effectively assessing and monitoring geothermal resources. It becomes imperative, therefore, to integrate additional techniques and methodologies that can complement and augment the capabilities of TIR remote sensing. By doing so, a more comprehensive and precise assessment of geothermal reservoirs can be achieved. Incorporating diverse approaches will contribute to a more holistic approach to geothermal exploration and monitoring, leading to improved decision-making and resource management in this study.

References

- Pambudi, N. A. (2018) Geothermal power generation in Indonesia, a country within the ring of fire: Current status, future development and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, pp. 2893–2901. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.096>.
- Qin, Q., Zhang, N., Nan, P., and Chai, L. (2011) Geothermal area detection using Landsat ETM+ thermal infrared data and its mechanistic analysis—A case study in Tengchong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(4), pp. 552–559. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.02.005>
- Sidik, M. and Harmoko, U. (2022) Potensi Energi Panas Bumi di Jawa Timur Sebagai Energi Alternatif Pengganti Energi Fossil. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 3(1), pp. 49–60. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13395>.

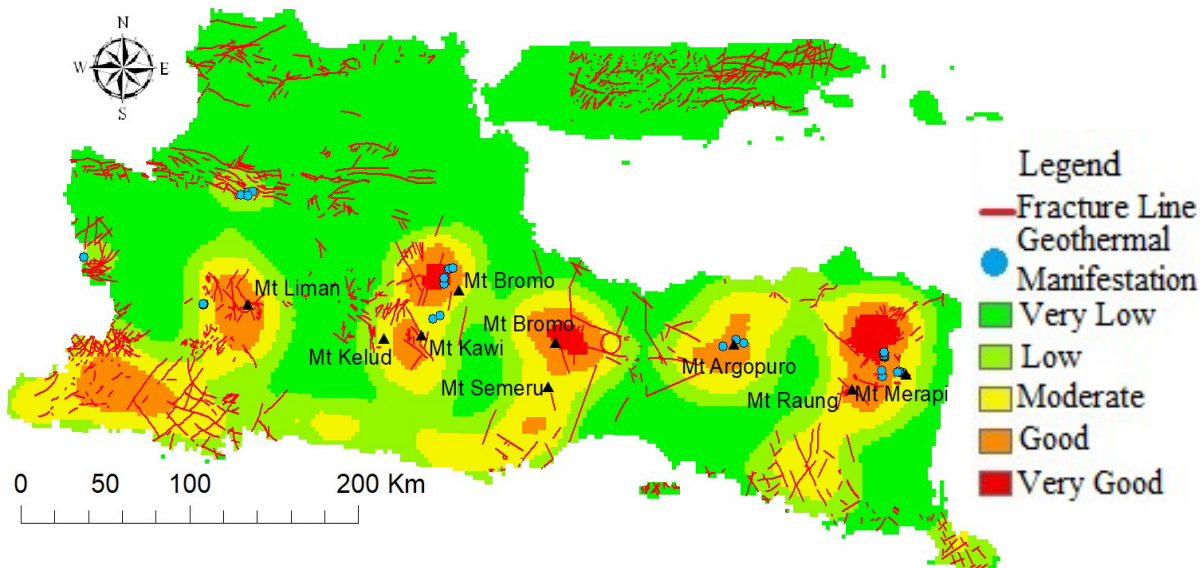


Figure 3. Potential geothermal zone map.

航空レーザ測量データを用いた ランダムフォレストによる斜面崩壊地の判読

植田 允教*・根本 達也*・ベンカテッシュ ラガワン*

Identification of Slope Failure Sites applying Random Forest Classification to LiDAR Data

Mitsunori UEDA*, Tatsuya NEMOTO* and Venkatesh RAGHAVAN*

*大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan. E-mail: so22000t@st.omu.ac.jp

キーワード：航空レーザ測量データ，斜面崩壊，判読，ランダムフォレスト

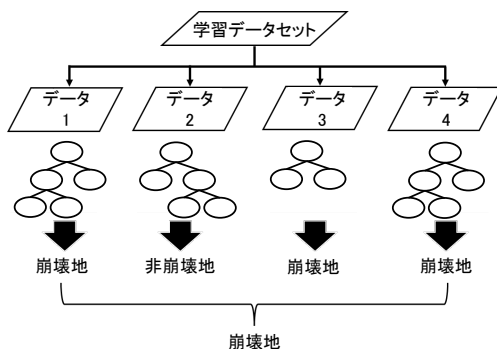
Key words: LiDAR data, Slope failure, Identification, Random Forest

1. はじめに

斜面崩壊は、斜面表層の土砂や岩石がある面を境界にして滑り落ちる現象であり、一度発生すると人命や社会的インフラに甚大な影響を与える。そのため、近年では斜面崩壊が発生した直後に航空レーザ測量が実施され、斜面変動の判読や解析が行われている（高見ほか，2019）。斜面崩壊の分布を調査する際、目視による判読・現地調査が実施される（Goto *et al.*, 2019）。しかし、目視の判読には、多大な労力と時間を要することや客観性に問題がある。本研究では、斜面崩壊後に取得された航空レーザ測量データを用いて機械学習の一種であるランダムフォレストによる解析を行い、斜面崩壊地の自動判読について検討した。

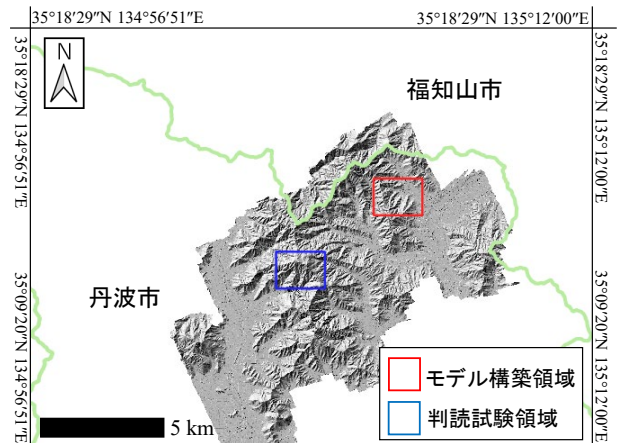
2. 判読手法とデータ

ランダムフォレスト (RF; Random Forest) は、決定木を組み合わせて学習を行うアンサンブル学習アルゴリズムである。斜面崩壊の判読へ適用する場合、崩壊地と非崩壊地の2値分類を行うと考えるとRFは、次のステップで行われる。1) 学習データセットから、アンサンブル学習を行うために複数のデータ群に分割する。2) 各データ群に対して、2値の分割境界を決定する木構造モデルである決定木を構築する。3) 決定木を並列で配置し、多数決で崩壊地あるいは非崩壊地に分類する（第1図）。



第1図 ランダムフォレストの概念図

Python で実行環境を構築し、学習パッケージには *scikit-learn* を使用した。データとして、2014年に兵庫県丹波市で斜面崩壊が発生した際に取得された航空レーザ測量データと測量と同時に撮影された航空写真を用いた。モデル構築領域と判読試験領域の2箇所を同市域から選び、対象地域とした（第2図）。航空レーザ測量データから作成したDEM（分解能: 1.0 m）から傾斜角と傾斜方位、地形形状である *Geomorphon* (Jasiewicz *et al.*, 2013) を算出した。DEMより算出した3つの地形情報に航空写真のRGB（分解能: 0.2 m）を含めて、6つのパラメータを準備した。学習の準備として、次の4つの処理を行った。1) DEMから作成した地形情報を0.2 m 間隔にリサイズを行った。2) 斜面崩壊と関係の小さい標高 95 m 未満の地域にマスク処理を実施した。3) モデル構築領域でランダムサンプリングを行い、学習データセットを作成した。この時、非崩壊地の面積に対して、崩壊地の面積が少なく偏りがあったことから、サンプルサイズを変更した2つのデータセットを作成した（第1表）。4) ランダムサンプリングで得たデータセットを学習用データ（70%）と検証用データ（30%）に分割した。学習用データを用いてRFを実行し、検証用データで学習し



第2図 対象地域と LiDAR で取得された標高モデル

第1表 準備した学習データセット

	サンプルサイズ	崩壊地	非崩壊地
データセット1	1000	500	500
データセット2	5500	500	5000

データセット1		予測値	
評価指標	指標値	正 (positive)	負 (Negative)
Accuracy	0.93	正 (positive)	負 (Negative)
Precision	0.91	真陽性 (TP)	偽陰性 (FN)
Recall	0.96	偽陽性 (FP)	真陰性 (TN)
F-measure	0.93		

データセット2		実測値	
評価指標	指標値	正 (positive)	負 (Negative)
Accuracy	0.95	真陽性 (TP)	偽陰性 (FN)
Precision	0.83	偽陽性 (FP)	真陰性 (TN)
Recall	0.67		
F-measure	0.75		

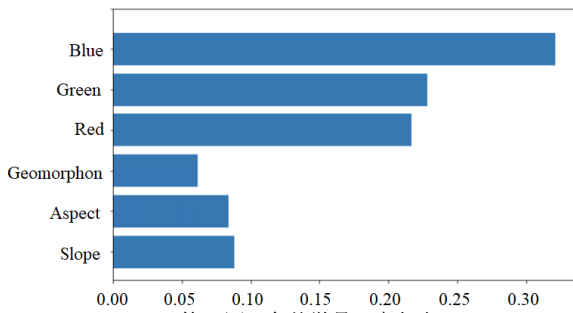
$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$F - measure = \frac{2 \times precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

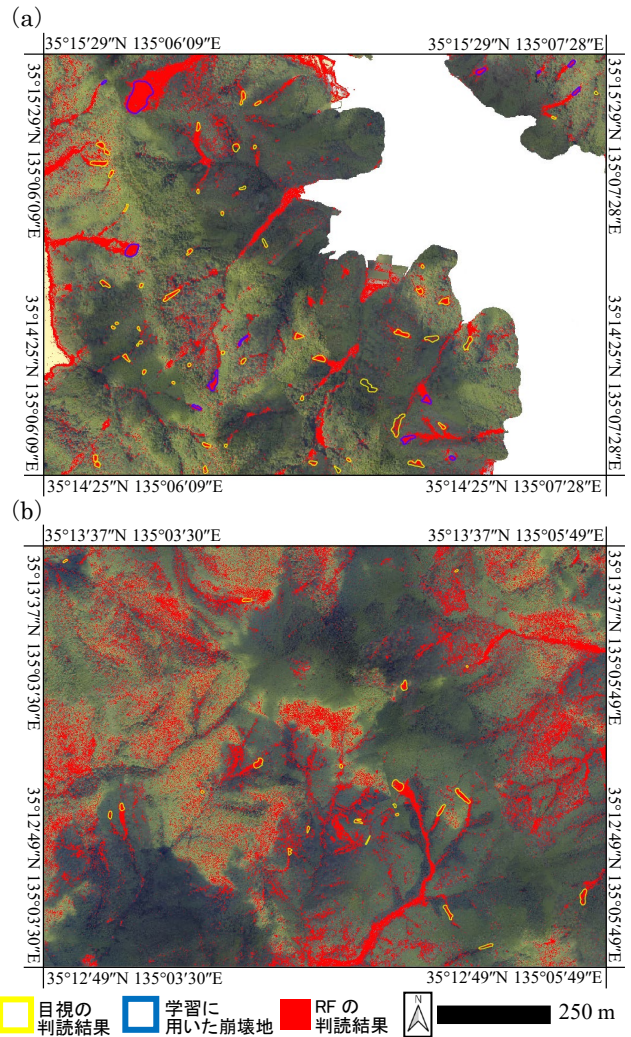
第3図 検証結果



たモデルの評価を行った。その後、学習したモデルをモデル構築領域と判読試験領域に適用し判読を行った。

3. 結果

モデル構築領域における検証結果を第3図に示す。学習モデルの評価には、混合行列による評価指標を用いた。本評価は、実際に判読した結果（実測値）とRFの結果（予測値）のマトリクスを作成することで、学習モデルの精度評価を行う。各評価指標は、それぞれ Accuracy はモデルがどれだけ正確に予測できているか、Precision は予測した斜面崩壊がどれくらい正確か、Recall は実際の斜面崩壊の内どれくらい予測できているか、F-measure は Precision と Recall のバランスを表している。データセット1の学習は、全ての指標で0.9を上回る結果となり、高い精度を示していることがわかる。データセット2は、Accuracy で高い値を示したものの他の評価指標において、データセット1を下回る結果となった。比較的高い値を示したデータセット1のモデルにおける各特徴量の寄与率を整理した（第4図）。6つのパラメータの内、最も学習に寄与した特徴量はBlueであり、本モデルでは色相が判読に多く影響を与えていることがわかった。逆に、寄与率が低い特徴量は Geomorphon であった。データセット1の学習モデルを用いてモデル構築領域と判読領域について判読を行った。結果を第5図に示す。第5図(a)の結果からは、誤判読が点在しているものの斜面崩壊の発生源から流下した下方まで崩壊地として判読できていることが確認できる。第5図(b)の結果では、概ね候補となるような箇所は、判読できているものの、斜面の中腹部において、誤判読している箇所があり、モデル構築領域よりも多くの誤判読が確認できた。



第5図 RFによる判読結果
(a)モデル構築領域の判読結果, (b)判読試験領域の結果

4. おわりに

航空レーザ測量データを用いてランダムフォレストによる斜面崩壊地の判読を行った結果、サンプルサイズを崩壊地・非崩壊地で同数に合わせたモデルが各指標で0.9と高い精度を示した。また、学習した領域だけでなく、未学習地域でも判読を行い、他の地域で自動判読ができる可能性を示すことができた。しかし、斜面の一部で誤判読が存在し、今後モデルの精度向上方法を検討していく必要がある。

文献

Goto, H., Kumahara, Y., Uchiyama, S., Iwasa, Y., Yamanaka, T., Motoyoshi, R., Takeuchi, S., Murata, S., and Nakata, T. (2019) Distribution and Characteristics of Slope Movements in the Southern Part of Hiroshima Prefecture Caused by the Heavy Rain in Western Japan in July 2018. *Journal of Disaster Research*, vol.14, no.6, pp.894-902.

Jasiewicz, J., Stepinski, T. (2013) Geomorphons - a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms, *Geomorphology*, vol.182, pp.147-156.

高見智之・向山栄・本間信一・佐藤匠(2019)多時期LiDAR-DEMを活用した斜面変動解析と評価。日本地すべり学会誌, vol.56, no.6, pp.295-305.

LiDar を利用した調査・設計事例

樋上 広篤*・立川 浩祥*・佐藤 明**・鏡原 聖史***

Survey and civil design examples using LiDar

Hiroshige Higami* , Hiroyoshi Tachikawa* , Akira Satou** , Satoshi Kagamihara***

* 株式会社ダイヤコンサルタント 北海道支社 Diaconsultants Co.Ltd, 2-13-2 Kita10-jonishi Kita-ku,Sapporo-shi, Hokkaido 001-0010Japan. E-mail:h.higami@diaconsult.co.jp, h.tachikawa@diaconsult.co.jp

** 株式会社ダイヤコンサルタント 本社 Sumitomofudosanakihabaraekimaebiru4F,300 Kandaneribeicho,Chiyoda-ku, Tokyo-to 101-0022Japan, E-mail: a.satou@diaconsult.co.jp

*** 株式会社ダイヤコンサルタント 関西支社 5-3 Toyotsucho,Suita-shi, Osaka-fu 564-0051Japan, E-mail: s.kagamihara@diaconsult.co.jp

キーワード： LiDar, UAV, 3次元モデル

Key words： LiDar, UAV, three-dimensional model

1. はじめに

近年, LiDar や UAV 等の技術の進歩が進んでおり, 建設コンサルタント業務でも調査や設計に活用することで業務効率化や設計精度の向上を図っている。

本紙では, LiDar や UAV 等の技術を用いて実施した業務事例について示す。

2. 技術概要

2.1 UAV を用いた航空測量

UAV は上空から短時間で広範囲の地形確認を行うだけでなく, 撮影したデータから SfM (Structure from Motion) の点群を取得し, 3次元モデルを作成することができる。ただし, SfM 点群は樹木等が繁茂する箇所では, その影響を受け詳細な地形データを取得できない場合がある。そういった場合にレーダー搭載の UAV を用いることで樹木等の影響が少ない詳細な地形データを取得することが可能であり, 取得したデータから設計検討を行うことができるなど調査業務だけでなく活用することのできる技術である。



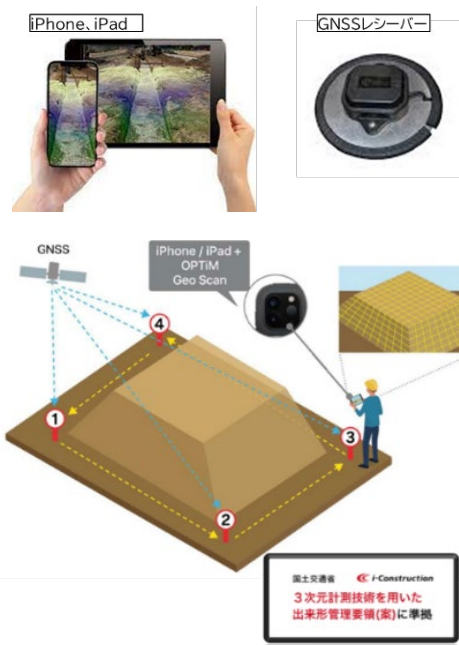
第1図 UAV 機器

2.2 LiDar 技術を用いた地上測量

国土交通省が設立した「ICT 普及促進ワーキンググループ」では, ICT 施工におけるモバイル端末を使用した LiDar 測量方法が, 出来形管理計測の利用に必要な精度(±50mm)を有すると評価し, 出来形管理要領を定められている。

今回紹介する「OPTiM Geo Scan」は, LiDar センサー搭載の iPad や iPhone と GNSS レシーバー取得の位置情報を組み合わせ, 短時間で同要領に準拠した 3次元データが取得

できる。本技術は, 起工測量だけでなく, 中間出来高測量, さらに出来形測量などさまざまな工程で利用可能となっている。ただし, LiDar センサーの照射距離は 5m 程のため, 調査は近接することができる箇所に限られる。



第2図 地上測量機器「OPTiM Geo Scan」

3. 業務への活用

前記の技術等を活用した業務(主に法面対策設計業務)についての具体的な事例を以下に述べる。

3.1 調査での活用

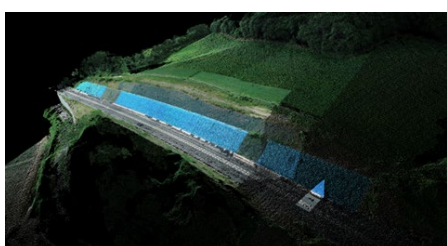
対象法面の背後地形状況など広範囲に確認するため UAV を用いた空撮の実施や, 既往の測量データにない応急対策工(大型土のう等)の寸法確認のため, SfM 点群から 3次元簡

易地形モデルを作成することで検討精度の向上を図った。

別発注の測量調査の影響で設計検討の遅れが懸念された箇所では設計検討を進めるために UAV の測量を検討した。対象箇所は、長大法面で樹木が繁茂していたため、2.1 で記載の通り SfM 点群では点群取得精度が低くなると考え、レーザーを搭載した UAV を用いることで詳細な 3 次元モデルを作成し、別発注の測量完了を待たず十分な設計検討時間を確保することができた。

また、上記とは別の箇所事例では段差等の変状の発生に対して、業務期間中に切土による応急対策が実施されたことにより、既往の測量成果による設計検討が行えない状況となった。対象箇所は、長大法面ではなく近接することが可能な法面であったため「OPTiM Geo Scan」を用いて点群を取得し、設計検討を行った。

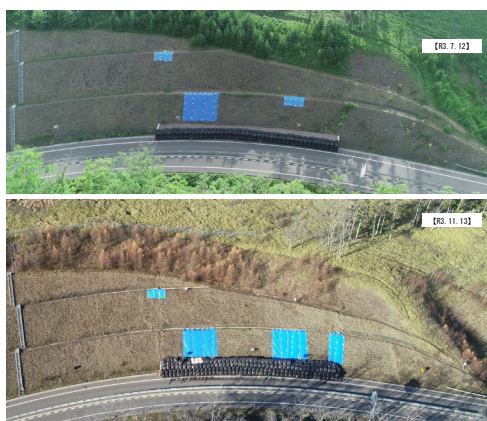
このように、現地状況によって調査方法を使い分けることも効率的に業務を進める上で重要となってくる。



第3図 3次元地形図

3.2 災害発生時での活用

既往のボーリング結果や地表踏査等からすべり面を見出し、変状の発生機構を的確に把握するために歪計等の観測機器を設置した箇所において、豪雨の影響で変位が確認された。早急に応急対策等の方針を検討するために変位確認後すぐに UAV を用いて対象法面を撮影し、変位前後の同一視点からの写真や 3 次元データから表面的な変位の進行性の確認に活用した。



第4図 同一視点からの比較写真

3.3 設計での活用

設計では、前項までの調査により取得した 3 次元地形データから設計図面を作成することで設計精度向上と時間短縮を図った。

また、3.2 記載のすべり面が確認された法面箇所の対策工は「受圧板及びグラウンドアンカー」を採用した。しかし、対象法面が高規格道路上のため施工時の交通を確保する迂回路計画やすべり面の影響などから施工計画が複雑化していた。そのため、取得した地形データ、360° 画像及び 3 次元

モデルから下記図のような施工ステップ図を作成することで協議等の円滑化を図った。



第5図 360° 画像+3次元データによる施工ステップ図

4. おわりに

本報告のような法面設計では、すでに災害の発生している箇所であり、早急な検討が求められることが多々あるため、前項までのデジタル技術に加えて、日進月歩で進化する新たな技術も活用しながら、効率的かつ精度の高い検討を今後も進めていきたい。

また地形情報など表面的な情報に加えて、今後は地質等の情報も含めた 3 次元モデルなども活用していきたいと考えている。

文 献

株式会社オプティム (OPTiM Corporation) : 3次元測量アプリ「OPTiM Geo Scan」
URL : <https://www.optim.co.jp/>

3次元波動伝播シミュレーションを用いた コンクリートひび割れの自己治癒評価手法の検討

奥出 信博*, Gerlinde Lefever**, 麻植 久史*, 塩谷 智基***

Evaluation method of self-healing state on concrete cracks using three-dimensional wave propagation simulation

Nobuhiro Okude*, Gerlinde Lefever**, Hisafumi Asaue*, Tomoki Shiotani***

*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 202, Innovation Plaza Kyoto, Nishikyo, Kyoto 615-8245
E-mail: okude.nobuhiro.2w@kyoto-u.ac.jp, E-mail: asaue.hisafumi.7a@kyoto-u.ac.jp

**ブリュッセル自由大学 Department of Mechanics of Materials and Constructions, Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050 Brussels, Belgium, E-mail: Gerlinde.Lefever@vub.be

***京都大学経営管理大学院 Consortium of Innovative Technique for Infrastructures, Kyoto University, 202, Innovation Plaza Kyoto, Nishikyo, Kyoto 615-8245, E-mail: shiotani.tomoki.2v@kyoto-u.jp

キーワード: コンクリート, 自己治癒評価, 弾性波, 3次元波動伝播シミュレーション

Key words : concrete, evaluation of self-healing, elastic wave, 3D numerical simulation

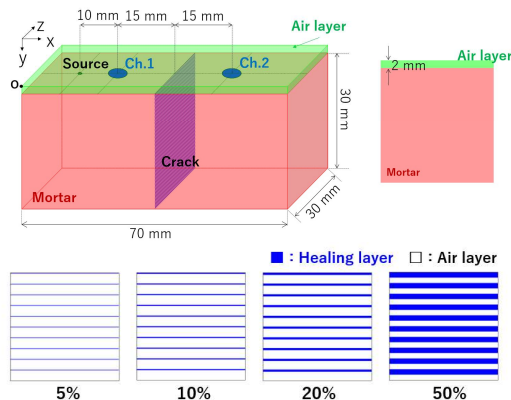
1. はじめに

従来、コンクリート構造物に生じたひび割れは、エポキシ樹脂などの有機系あるいは無機系の補修材料を用いて補修（注入あるいは充填）される。近年、コンクリート自らがひび割れを修復する、いわゆる“自己治癒コンクリート”の開発が活発に進められている。例えば、超吸水性ポリマー（SAP: super absorbent polymer）を混入させたコンクリートでは、ひび割れに伴う外部からの水の供給により SAP が膨潤し、ひび割れを閉塞するとともに炭酸カルシウムの析出を促す。また、細菌を用いた方法（H.M. Jonkers, 2011）も提案されており、その代謝反応により析出した炭酸カルシウムによりひび割れを閉塞させるなど、自己治癒のメカニズムは多様である（岸, 2015）。このような人手を要さない構造物のメンテナンスは、財源の削減に大きく寄与するものと期待される。その一方、ひび割れ内部の自己治癒が期待どおりなされているのか？ または、どの程度なされているのか？ を非破壊かつ定量的に評価する手法は未だ確立していない。そこで、著者らは弾性波の伝播特性に着目し、基礎実験をとおして弾性波の速度および振幅値が自己治癒過程の評価に有効であることを示してきた（G. Lefever, 2022）。

本研究では、ひび割れの自己治癒状態を、治癒層の剛性ならびにその充填率として定量的に評価する手法について検討すべく、自己治癒の各過程をモデル化し、それらに対し3次元波動伝播シミュレーションを行った。各モデルにおける治癒層の条件と弾性波伝播特性の関係から、定量評価手法への適用性について考察した。

2. 3次元波動伝播シミュレーション

3次元波動伝播シミュレーションソフトウェア（Wave3000, CyberLogic社）を用いて解析を行った。第1図および第1表に解析モデルと各物性値を示す。解析モデルは角柱のモルタルとした。ひび割れの自己治癒過程を想定し、幅0.2mmのスリット内に、種々の弾性係数（0.01～70 GPa）を有する材料を満たした。さらに治癒層の充填度合いの影響を確認するため、0.01 GPaと10 GPaについては、スリット面に対する治癒層の充填率を5～100%に変化させた。これら各モデルについて、スリットから25mm離れたモルタル表面から、450 kHzの正弦波1波長分を発生し、そのとき Ch.1 及び Ch.2 で得られる表面変位の経時変



第1図 解析モデル

化を記録した。これらの波形を基に式(1), (2)で示す *Velocity* と *Attenuation* を算出した。*L* はセンサ間距離(mm), *t_{Ch.1}*, *t_{Ch.2}*, *A_{Ch.1}*, *A_{Ch.2}* はそれぞれ *Ch.1*, *Ch.2* における到達時間 (s) と最大相対変位を示す。なお、シミュレーションにおいて、*x*, *y*, *z* 軸の全ての境界は無境界とした。

第1表 解析の各物性値

	モルタル	空気	治癒層の弾性係数 (GPa)				
			0.01	0.1	1	10	70
密度 ρ (kg/m ³)	2170	1.293	1600				
ラメ第一定数 λ (MPa)	16100	0.147	5.77	57.7	577	5770	40400
ラメ第二定数 μ (MPa)	10700	0.000	3.85	38.5	385	3850	27000

$$Velocity = \frac{L}{t_{Ch.2} - t_{Ch.1}} \quad (1)$$

$$Attenuation = -\frac{20}{L} * \log \frac{A_{Ch.2}}{A_{Ch.1}} \quad (2)$$

3. 結果および考察

第2図および第3図に、治癒層の剛性に対する *Velocity* および *Attenuation* を示す。治癒層の剛性が増加するに伴い、*Velocity* は増加し、*Attenuation* は減少する傾向が示される。この傾向は剛性が小さい場合に顕著である。

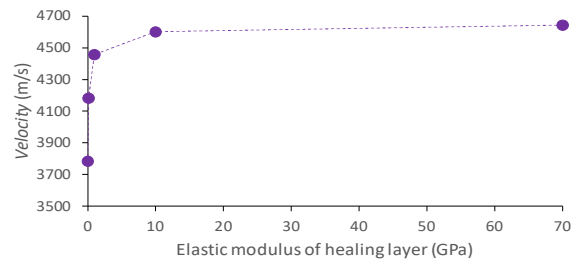
第4図にひび割れ面に対する治癒層の充填率と *Velocity* の関係を示す。治癒層の剛性の違い (10 GPa と 0.01 GPa) により *Velocity* の値に大きな差がある。どちらの剛性の場合も充填率の増加に伴い *Velocity* が速くなる傾向が見られる。しかし、剛性の違いと比較し、充填率の違いによる変化はわずかである。治癒層の充填率が5%から100%に変化した場合の *Velocity* の変化率を見てみると、剛性が10 GPaの場合で約4% (4400 → 4600 m/s)、剛性0.01 GPaの場合で約8% (3500 → 3800 m/s) といずれも10%に満たない。一方、第5図に示すとおり、治癒層の充填率が5%から100%に変化した場合の *Attenuation* の変化率は、剛性0.01 GPaの場合で約-4% (1.4 → 1.3) とわずかであるが、剛性10 GPaの場合は約-50% (0.8 → 0.4) と大きく変化していることが分かる。*Velocity* とは異なり、*Attenuation* の場合は、特に剛性が大きい場合、治癒層の充填率の影響を大きく受けることが分かった。

4. おわりに

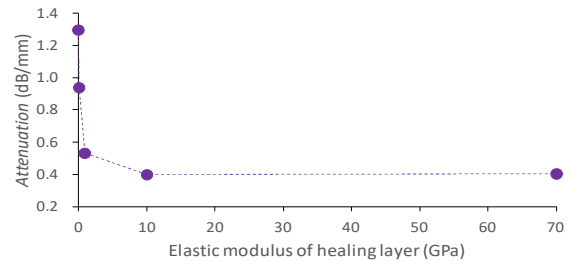
以上のシミュレーション結果より、①②を確認した。

- ①ひび割れを満たす治癒層について、その剛性が増加するに従い *Velocity* は増加し、*Attenuation* は減少する。この傾向は低い剛性で著しい。
- ②治癒層の充填率について、*Velocity* への影響は小さく、*Attenuation* への影響は大きい。剛性が大きい場合、その影響は著しい。

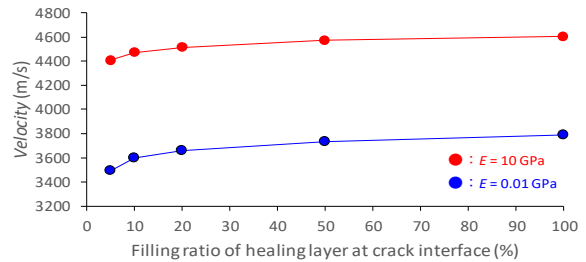
①より、治癒層がひび割れを満たす場合、*Velocity*, *Attenuation* のいずれかを指標とすることで、その剛性を推定できると考えられる。②より、治癒層がひび割れを満たさない場合でも、*Velocity* と *Attenuation* の異なる振る舞いを利用することで、治癒層の剛性およびその充填率を推定することが可能と考えられる。例えば、*Velocity* は治癒層



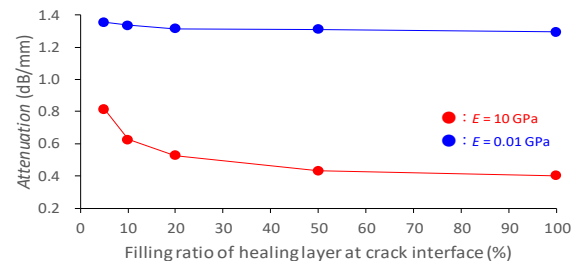
第2図 治癒層の剛性と *Velocity*



第3図 治癒層の剛性と *Attenuation*



第4図 治癒層の充填率と *Velocity*



第5図 治癒層の充填率と *Attenuation*

の充填率の影響を受けにくいことから、実際の測定で得られた *Velocity* により剛性を概ね評価することが可能であり、さらに各剛性において、充填率と *Attenuation* の関係をシミュレーションにより明らかにしておけば、治癒層の充填率を推定できると考えられる。

文 献

H. M. Jonkers (2011) Bacteria-based self-healing concrete, HERON, Vol. 56, pp.1-12
 岸利治 (2015) コンクリートのひび割れ自己修復/自己治癒, 日本画像学会誌, 第54巻, 3号, pp.236-242
 G. Lefever, D. Van Hemelrijck, D. Snoeck, D.G. Aggelis (2022) Self-healing assessment of cementitious mortars through ultrasonic monitoring, Cem Concr Compos, 133, 104683

Wavelet 変換に基づくレイリー波速度トモグラフィ法による コンクリートダム の健全性評価

麻植 久史*, 塩谷 智基*, 小堀 俊秀*, 金銅 将史**

Soundness Evaluation of Concrete Dam Using Rayleigh Wave Tomography Method Based on Wavelet Transform

Hisafumi Asaue*, Tomoki Shiotani*, Toshihide Kobori**, Masashi Kondo**

*京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyotodaigaku-Katsura,
Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540, Japan.

E-mail: asaue.hisafumi.7a@kyoto-u.ac.jp

**国土交通省 国土技術政策研究所 National Institute for Land and Infrastructure Management

キーワード: 損傷評価, 可視化, ひび割れ

Key words : Damage evaluation, Visualization, Crack

1. はじめに

コンクリートダムには、温度応力、堤体材料、環境作用、流水作用、および偶発外力などの要因の組み合わせにより、多様な劣化損傷が生じる。その劣化損傷の発生や進展のメカニズムより、堤体内部に伸展するひび割れはコンクリートダムの安定性の観点から特に注意すべきである。しかし、ひび割れの調査には、目視調査やコアボーリング調査が主に実施されており、これらの手法では、内部に進展するひび割れ分布を把握するのは困難である。そこで、本研究では、Wavelet 変換に基づいたレイリー波速度トモグラフィ法を、コンクリートダム堤体の水平打継面に存在するひび割れに適用した結果、ひび割れの内部進展状況が把握できた。これより、コンクリートダムの劣化損傷調査には、目視で確認できたひび割れに本手法を適用して、ひび割れ伸展深度や範囲を把握した上でコアボーリング調査を実施すれば、より効率的な健全度評価が可能となる。

2. 解析手法

レイリー波速度トモグラフィでは、レイリー波のエネルギー (67%) がP波 (26%) やS波 (7%) に比べて相対的に大きいことを利用して、送信と受信で計測された波形の最大振幅の時間差から推定される伝搬時間を使用する。このとき、伝搬深度は、弾性波励起で打撃される鋼球の直径に依存して決まる¹⁾。そのため、深度毎の速度分布を把握するには直径の異なる複数の鋼球で打撃して計測する必要がある。本研究では、鋼球打撃により計測された弾性波に Wavelet 変換を適用して、2~6 kHz の周波数成分における最大振幅の伝搬時間を抽出した (図 1)。これにトモグラフィ解析²⁾を実施することで、レイリー波の速度分布が推定できる。

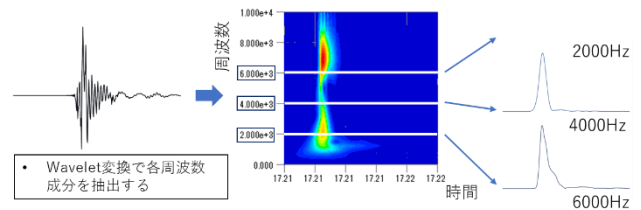


図 1 Wavelet 変換による周波数成分の抽出

3. 計測概要

計測は実コンクリートダム下流面の水平打継面を対象に行った。対象領域を図 2 に示す。ひび割れが顕在化した場所を領域 1、していない場所を領域 2 として計測対象とした。弾性波はφ75 mm (上限周波数 4 kHz 程度) の鋼球打撃で励起した。計測には、ワイドバンドレコーダー (WX-7000SYR, TEAC 製) と圧電型加速度センサ (3 Hz~20 kHz) を用いた。センサ配置と打撃点を図 3 に示す。

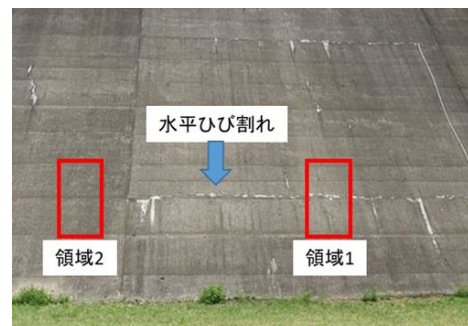


図 2 計測対象領域

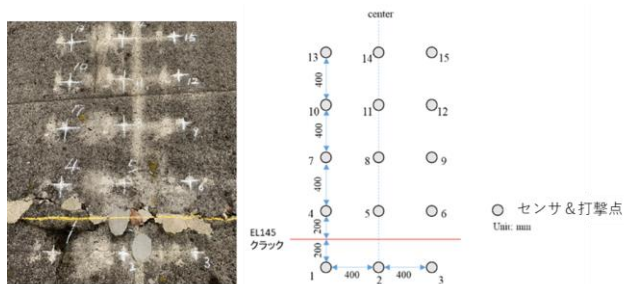


図3 センサ配置と打撃点

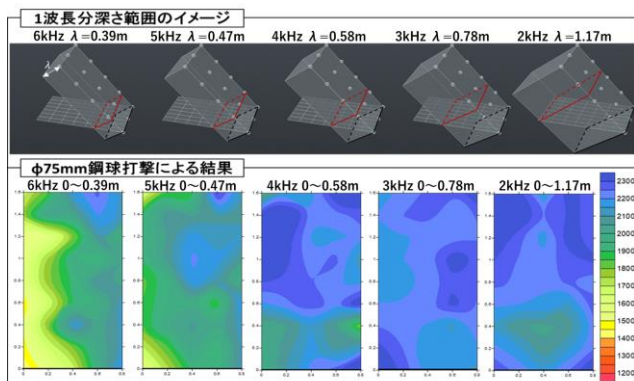


図5 領域2における解析結果

センサ間隔は 400 mm と設定し、打撃は各センサ近傍で実施した。このとき、打撃点の近傍のセンサを送信、そのほかのセンサを受信として、データを記録した。また、1 点の打撃点につき 10 回打撃してデータを取得し、スタッキングして解析に使用した。

4. 解析結果

領域 1 における解析結果を図 4 に示す。図中上図の赤線が、ひび割れの奥行延長上の位置を示している。対象領域にはひび割れが目視できており、右岸側では、ひび割れが上下に 2 本あるように見える。レイリー波速度トモグラフィ結果を見るとひび割れ延長線上において、3~6 kHz で見えている低速度帯 (1600 m/s 以下) が、2 kHz で確認できなくなっている。これは 1.17 m 付近でのひび割れ連続性が小さく (接触面積が大きくなる) なっていることを示唆している。この箇所のひび割れ深度はコアボーリング調査より 1.13 m と推定されており、これとほぼ一致している。また、領域 2 における解析結果を図 5 に示す。図より、全ての周波数において、領域 2 のレイリー波速度が基本的に 1400 m/s 以上になっており、周波数 4 kHz, 3 kHz, 2 kHz のトモグラフィ結果は主に 2000 m/s 以上になっている。これより、領域 2 は領域 1 より相対的に健全だと推定できる。また、周波数 6 kHz と 5 kHz のトモグラフィ結果には、右岸側にそれぞれ 1500 m/s, 1800 m/s の相対的に速度が低下している領域が存在している。領域 2 の P 波速度トモグラフィ解析結果 (図 6) にも、同様の位置に深さ約 40 cm の低速領域が確認でき、この位置における浅い範囲内 (40 cm 以内) に劣化が発生していることを示唆している。上記の結果より、本手法の妥当性が示された。また、ひび割れ伸展分布を可視化することが可能となり、コンクリートダム の健全性評価が効果的に

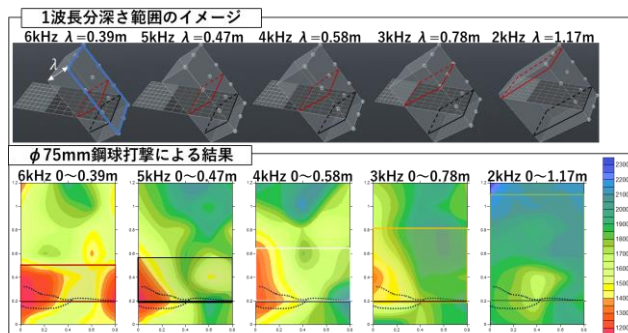


図4 領域1における解析結果

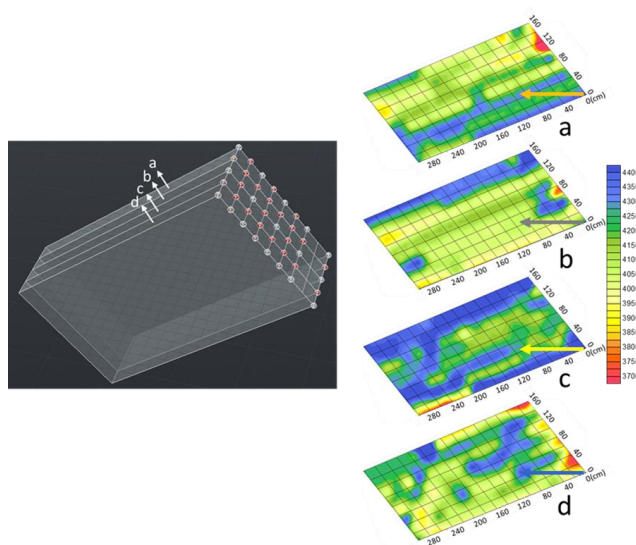


図6 領域2におけるP波速度トモグラフィ解析結果

実施できることが示された。

5. まとめ

本研究では、Wavelet 変換に基づくレイリー波速度トモグラフィにより、コンクリートダム の健全性評価を実施した。比較のため、ひび割れが目視できる場所とひび割れの無い場所を選定して本手法を適用したところ、ひび割れの分布に対応した速度分布を得ることができた。結果として、領域 1 のひび割れは右岸側で深くなっており、深度は 1 m ほどであることが示された。これはコアボーリング調査結果と調和している。本研究より、従来の調査法では困難であったひび割れの伸展分布を効果的に把握することが可能となった。

謝辞: 本研究は、国土交通省 河川砂防技術研究開発公募の支援を受けて実施された。

文献

- 1) Sansalone & Strett, 1997, Impact-Echo, Bullbrier Press.
- 2) Kobayashi, Y., T. Shiotani, D.G. Aggelis and H. Shiojiri: Three-dimensional seismic tomography for existing concrete structures, Proceedings of Second International Operational Analysis Conference, Vol. 2, pp. 595-600, 2007.

掘削コア試料 X 線 CT 画像中の脈状鉱物の自動検出に基づく 海洋地殻の浸透率構造の推定

赤松祐哉*・片山郁夫**・岡崎啓史**・道林克禎***

Paleo-permeability structure of oceanic crust based on automated detection of veins in X-ray CT core images

Yuya Akamatsu*, Ikuo Katayama**, Keishi Okazaki**, and Katsuyoshi Michibayashi***

* 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 Research Institute for Marine Geodynamics, JAMSTEC, 2-15 Natsushima-cho, Kanazawa-ku, Yokosuka, 237-0061, Japan. E-mail: akamatsuy@jamstec.go.jp

** 広島大学 先進理工系科学研究科 Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, 1-3-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan.

*** 名古屋大学 環境学研究科 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan.

キーワード：浸透率，脈状鉱物，科学掘削，X線 CT，画像処理

Key words: Permeability; Vein mineral; Scientific drilling; X-ray CT; Image processing

1. はじめに

浸透率は地下の流体移動の時空間的变化を理解するために重要なパラメータであり、岩石内部に存在する亀裂に強く影響を受ける。流体の流路として機能した亀裂は岩石中に脈状鉱物として保存されるため、脈状鉱物の分布や形状を流体の浸透モデルに適用することで、岩石の過去の浸透率 (paleo-permeability) を推定することができる。本研究は、海洋地殻の流体循環に対する亀裂の影響を評価するために、ICDP Oman Drilling Project によって採取されたコア試料の X 線 CT 画像を用いて、コアに含まれる脈状鉱物とその特徴を自動的に検出する手法を開発し、コア試料の浸透率構造の推定を行った (Akamatsu et al., 2023)。

2. 手法

2.1 前処理・エッジ検出

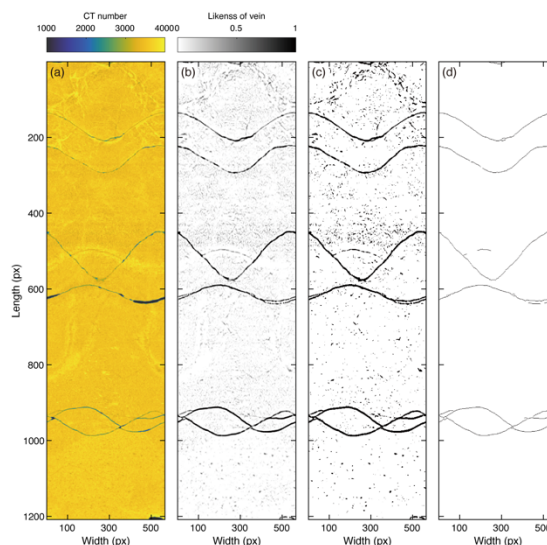
円柱状のコア試料に含まれる平板状の脈状鉱物は、コア側面の展開図において正弦波として現れるため、その正弦波を表すパラメータを求めることで、コアに含まれる脈状鉱物を検出することができる。まず、コアの 3 次元 CT 画像の中心から 100 ピクセル (35.2 mm) の半径を持つ円柱状の領域を抽出し、その展開図を作成する (第 1 図 a)。次に、multiscale Hessian filter (Jerman et al., 2015) を用いて CT 値の勾配から線状の構造を検出し (第 1 図 b)、P タイル法を用いて画像を二値化する (第 1 図 c)。得られた二値画像にいくつかのフィルターを適用しノイズを除去することで、脈状鉱物のエッジを検出する (第 1 図 d)。

2.2 ハフ変換

得られた二値画像に含まれる正弦波状のオブジェクトを、パターン認識手法の一種であるハフ変換を用いて検出する。画像中に現れる正弦波は以下の式で表現できる。

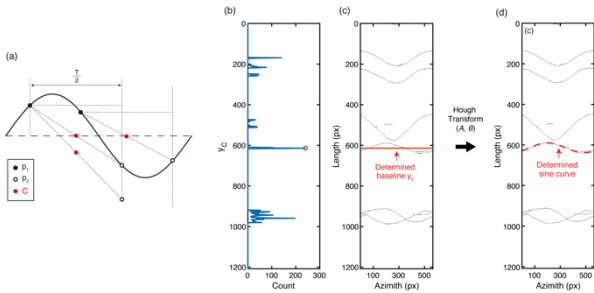
$$y = A \sin(\omega x + \theta) + y_0$$

ここで、 A, θ, y_0 はそれぞれ正弦波の振幅、位相、深さであり、



第 1 図. コア CT 画像の展開図におけるエッジ検出の例。

$\omega = 2\pi/T$, T は画像の幅である。したがって、画像空間中の点 (x, y) を (A, θ, y_0) 空間に投影する 3 次元のハフ変換を行うことで、画像中の正弦波を検出できる。本研究では計算効率を高めるために、2 段階に分けてこれらのパラメータを決定する two-step ハフ変換 (Changchun and Ge, 2002) を反復的に行なった。この手法では、まず正弦波の対称性を利用して y_0 の探索を行い、正弦波が存在する可能性の高い位置 y_c を検出する (第 2 図 a-c)。得られた y_c を用いて、点 (x, y) を (A, θ) 空間に投影する 2 次元のハフ変換を行う (第 2 図 d)。決定された正弦波の周囲のピクセルから脈状鉱物の平均開口幅と平均 CT 値を決定し、それらの点を二値画像から取り除く。この操作を画像中のエッジ数がしきい値以下になるまで繰り返すことで、画像中の正弦波状のオブジェ



第2図. Two-step ハフ変換の例.

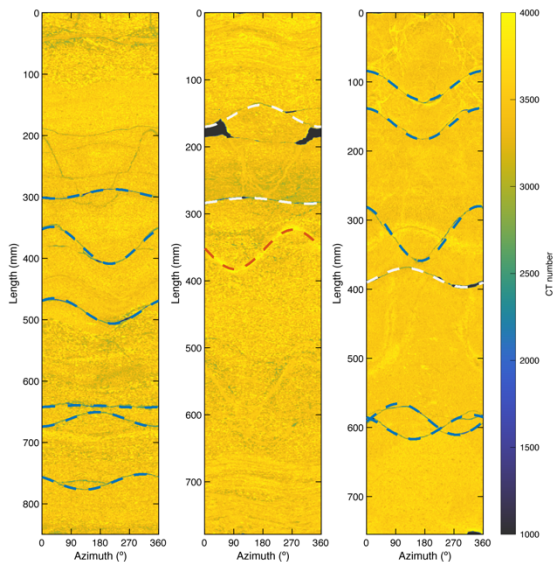
クトを偽陽性オブジェクトの検出を避けながら効率的に検出することができる。

この操作を、オマーンオフィオライトにおいて海洋地殻のシート状岩脈—はなれい岩層遷移帯に相当する ICDP Oman Drilling Project Hole GT3A で掘削・回収されたコア試料 400 m の X 線 CT 画像に適用し、コアに含まれる脈状鉱物の検出、それらの形状パラメーターの決定、および流体移動モデルに基づく浸透率構造の推定を行なった。

3. 結果・考察

3.1 脈状鉱物の検出

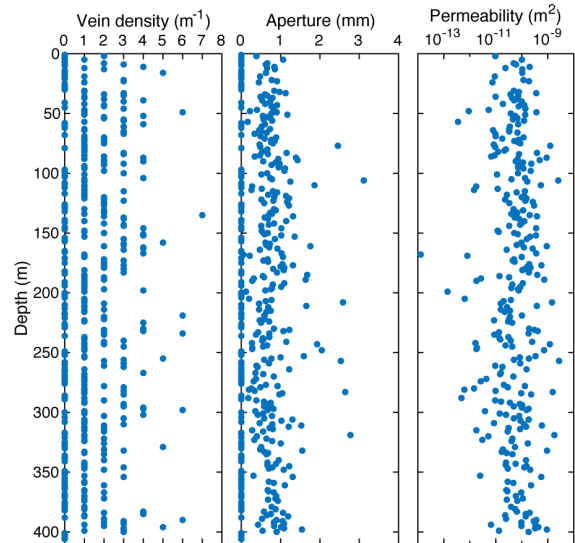
全長約 400 m のコア試料から、母岩の平均 CT 値よりも高い脈状鉱物 (High-CT vein) と低い脈状鉱物 (Low-CT vein) がそれぞれ 45 本、571 本検出された。展開図上で明瞭な正弦波状になるものや、CT 値が周囲と明確に異なるものは正確に検出された (第3図)。一方で、断続的なものや形状が不明瞭なもの、CT 値が周囲と同じくらいのもは検出されなかった。



第3図. 脈状鉱物の検出結果の例. 青色, 赤色, 白色の破線はそれぞれ Low-CT vein, High-CT vein, Fracture を表す。

3.2 浸透率構造の推定

第4図は、1 m ごとに算出された Low-CT vein の出現頻度 (ベイン密度) と開口幅の深さ変化を示す。掘削孔全体の平均ベイン密度は 1.43 本/m で、平均開口幅は 0.71 mm であった。等価流路モデル (Walsh and Brace, 1984) に基づくと、1 m あたり n 本、平均開口幅 w の平板状の亀裂を含む岩石のバルク浸透率 k は、以下の式で与えられる。



第4図. Hole GT3A で検出された Low-CT vein の 1 m ごとの平均ベイン密度, 開口幅, 浸透率の深さ変化。

$$k = \frac{nw^3}{12}$$

Hole GT3A で決定された脈状鉱物のパラメーターを用いると、計算されるバルク浸透率は 10^{-9} m^2 から 10^{-12} m^2 の値を示した。この値は、室内実験で求められる値よりも数桁高く、実際の海洋底の掘削孔で観測される値と整合的である。これは、開口幅が数ミリメートルのメソスケールの亀裂が、海洋地殻内部の流体移動を支配している可能性を示唆する。

4. 結言

本研究は、掘削コア試料の X 線 CT 画像を用いて、脈状鉱物を自動的に検出する手法を開発した。提案手法を Oman Drilling Project で採取されたコア試料データに適用した結果、開口幅が数ミリメートルスケールの脈状鉱物が多数検出された。亀裂の流体移動モデルに基づくと、検出された脈状鉱物はかつて極めて高い浸透率を持っていた可能性があり、海洋地殻の流体循環に大きく寄与していたことが示唆された。

文 献

- Akamatsu, Y., Katayama, I., Okazaki, K., and Michibayashi, K. (2023) Paleo-permeability structure of the crustal section of the Samail ophiolite based on automated detection of veins in X-ray CT core images from the Oman Drilling Project. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.
- Jerman, T., Pernuš, F., Likar, B., & Špiclin, Ž. (2015). Beyond frangi: An improved multiscale vesselness filter. In *Medical imaging 2015: Image processing* (Vol. 9413, p. 94132A). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.2081147>
- Changchun, Z., & Ge, S. (2002). A hough transform-based method for fast detection of fixed period sinusoidal curves in images. In *6th international conference on signal processing, 2002*. (Vol. 1, pp. 909–912 vol.1). [ieeexplore.ieee.org. https://doi.org/10.1109/ICOSP.2002.1181204](https://doi.org/10.1109/ICOSP.2002.1181204)

360 度カメラ撮影による点群化と橋梁の定期点検支援技術開発

小椋紀彦*・小西雄治**・福地良彦***・塩谷智基****

Point Grouping by 360-Degree Camera Shooting and Development of Technology to Support Periodic Inspection of Bridges

Norihiko Ogura*, Yuji Konishi**, Yoshihiko Fukuchi***, Tomoki Shiotani****

* 京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 インフラ先端技術産学共同講座 iTi Laboratory, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, 202, Innovation Plaza Kyoto, Goryoohara, Nishikyo-Ku, Kyoto 615-8245, Japan. E-mail: ogura.norihiko.2z@kyoto-u.ac.jp

** 株式会社 CORE 技術研究所 Department of Technology, CORE Institute of Technology Corp., 3-8-5 VORT Bld.8F, Asakusabashi, Taitou-ku, Tokyo 111-0053, Japan. E-mail: y.konishi@coreit.co.jp

***オートデスク株式会社 Autodesk Ltd. Japan, 1-8-10 24F Harumi Island Triton Square Office Tower X, Harumi, Chuo-ku, Tokyo 104-6024, Japan. E-mail: Yoshihiko.fukuchi@autodesk.com

**** 京都大学経営管理大学院 Consortium of Innovative Technique for Infrastructures, Kyoto University, 202, Innovation Plaza Kyoto, Goryoohara, Nishikyo-Ku, Kyoto 615-8245, Japan. E-mail: shiotani.tomoki.2v@kyoto-u.ac.jp

キーワード：360度カメラ，三次元点群化，橋梁点検，BIM/CIM

Key words：360 degree camera, 3D point cloud, bridge inspection, BIM / CIM

1. はじめに

道路橋の老朽化による交通システムの脆弱性が表面化している昨今では、少子高齢化による技術者不足や、点検にかかる費用の増大も相まって、効率的で省力化された点検技術の導入が喫緊の課題となっている。

三次元点群データを用いた橋梁点検(福地, 2021)では、360度カメラで撮影された動画データより3D点群データを生成、画像より構造物表面の損傷の特定、発注者指定様式による点検調書作成までの工程を一気通貫のクラウドサービスで実現することで点検業務の大幅な省力化を実現することができる。

そこで本稿では、イリノイ大学アーバナシャンペーン校の土木工学およびコンピューターサイエンス教授である Dr. Mani らが共同設立した Reconstruct Inc.により提供するクラウドサービス(Jacob J.Lin, 2021)を活用し、これら橋梁の定期点検支援技術の開発を行った検討結果を述べる。

2. 点検対象橋梁

点群化による定期点検支援技術の対象となる橋梁は、単純プレテンション方式 PC 中空床版橋で河川と交差している道路橋である。本橋梁は、桁下面と水面の間の高さが低く、橋梁点検車の使用が困難である。平素の定期点検ではゴムボートによって実施しているが、ゴムボートを使用しても桁下面を近接目視点検する場合にはボート上に起立せねばならず、作業として不安全であり点検効率も高くない方法であることから、ドローンを使用した点群化による点検が適当であると判断された。さらに本橋梁が第三者被害予防措置点検の対象ではないことから、定期点検支援技術の利用が適当である。



第1図 対象橋梁

3. 点検手法

3.1 360度カメラによる動画撮影

3D点群データの元となる動画撮影では、橋梁の構造形式や桁下状況により、徒歩もしくはドローン(第2図)による動画撮影を使い分けて用いる事ができる。従来の点検で使用してきた仮設足場や橋梁点検車、ボートなどの設備を要することなく、現地での点検日数の短縮でき、仮設費用を低減することが可能となる。

撮影に用いるカメラは360度カメラが基本となる。撮影の際には撮影ルートに死角ができないように留意し、蛇行しながら橋梁全体を撮影する。添架物等でやむをえない場合には死角となる場所を記録する。



第2図 動画撮影に用いる360度カメラとドローン

3.2 クラウドサーバーへのアップロードと三次元点群データの生成

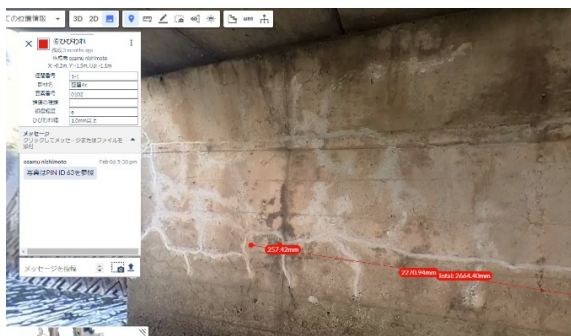
撮影された動画をクラウドサーバーにアップロードすると、3D点群モデル、3Dメッシュモデル、2Dオルソフォトが生成される。これらのモデルは、動画データをクラウドサーバーへアップロード後、数時間～半日程度で自動生成され、閲覧することができる。さらに、これらのモデルはBIMモデルと統合することで、点検対象橋梁の3D点群モデルによる現状をBIMモデルによる設計情報に重ね合わせて比較することが可能となる。



第3図 生成された3D点群データ

3.3 損傷の記録

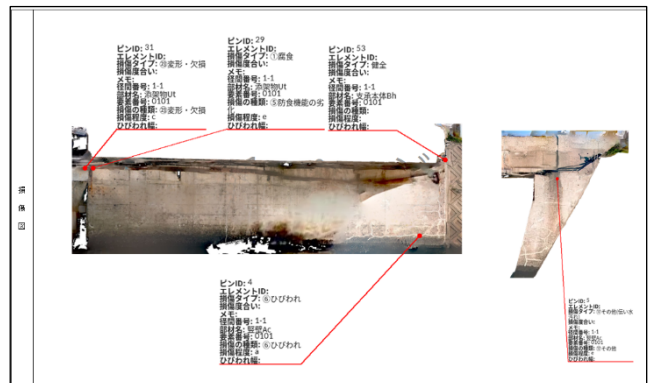
生成された橋梁の点群データをウェブビューア上で点検する。点検者は、任意の視点よりオルソフォトを生成し、点検対象の3D点群と3D点群上に正確に配置された高解像度画像上に損傷状況を記録する。これにより、現場での野帳への記録作業を省略できる。記録には、注釈や測定値などの文字情報に加えてPDF、DOC、XLS、JPGなどを添付する形で3Dモデル上の任意の位置にマークを落とす機能を有す。



第4図 オルソ画像上での損傷記録

3.4 点検調書作成

記録された損傷は、点検調書ともリンクされ、各自自治体の点検調書様式の損傷図および損傷写真としての出力が可能となる。



第5図 損傷図(その5)の出力イメージ

写真番号	1	2	3	4	5	6	7
部材名	主桁	主桁	主桁	主桁	主桁	主桁	その他
写真番号	0101	0101	0101	0101	0101	0101	0101
損傷の種別	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	その他
写真番号	4	5	6	7	8	9	10
部材名	主桁	主桁	主桁	主桁	主桁	主桁	その他
写真番号	0101	0101	0101	0101	0101	0101	0101
損傷の種別	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	剥離・剥離剥離	その他

第6図 損傷写真(その6)の出力イメージ

4. 結果および考察

三次元点群データによる橋梁点検支援技術の導入により、現場でのドローンによる動画撮影は30分程度で完了し、データ収集の大幅な効率化が可能となった。クラウド上の3D点群モデルを用いたリモート目視点検作業では、過年度点検の損傷に加えて新規損傷も検出できており、高精度の点検作業が可能であることが確認された。これらの結果より、条件を整えば三次元点群データによる橋梁点検は、その精度を犠牲にすることなく、効率化が可能であるといえる。

5. おわりに

三次元点群データの利用により現場作業が効率化され、点検精度も従来の目視点検程度の精度であることが確認されたが、今回検証されたのは点検作業に関するもののみであった。三次元点群データは、BIMモデルとの統合することにより、設計情報と合わせて比較・検証が可能である。また、点検データや調書類はBIM運用プロセス国際標準であるISO19650シリーズに準拠したクラウドサーバー上に保存されているため、次回点検時に過去点検との比較が容易となり、長期的な橋梁点検・維持管理の効率化が期待される。

文 献

福地義彦(2021)橋梁点検をDX～橋梁点検ワークフロー自動化の試み～, JACIC 情報 123号, Winter, pp.67-70
 Jacob J.Lin (2021) Bridge Inspection with Aerial Robots, Journal of Computing in Civil Engineering, Volume 35 Issue 2

マウンド型・埋没型鉱床の両方をマッピング可能な海洋電磁探査法の開発

石須慶一*・笠谷貴史**・後藤忠徳*・小池克明***・シリポンバラポンウィラシャイ****・
岩本久則*****・川田 佳史**・石橋 純一郎*****

Development of a marine controlled-source electromagnetic method capable of mapping both mound and blind ore bodies

Keiichi Ishizu*, Takafumi Kasaya**, Tada-nori Goto*, Katsuaki Koike***, Weerachai Siripunvaraporn****, Hisanori Iwamoto*****, Yoshifumi Kawada**, Jun-ichiro Ishibashi*****

*兵庫県立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, University of Hyogo, 2167, Shosha, Himeji, Hyogo 671-2280 JAPAN. E-mail: k.ishizu@sci.u-hyogo.ac.jp

**海洋研究開発機構海底資源センター Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Research Institute for Marine Resources Utilization, Kanagawa, Japan.

***京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.

****マヒドン大学理学部 Faculty of Science, Mahidol University, Rama VI Rd., Rachatawee, Bangkok 10400, Thailand.

*****日本海洋事業株式会社 Nippon Marine Enterprises, Ltd., 14-1, Ogawa-cho, Yokosuka, Kanagawa 238-0004, Japan.

*****神戸大学 海洋底探査センター Ocean-Bottom Exploration Center, Kobe University, Kobe 658-0022, Japan

キーワード：比抵抗，電磁探査，電気探査

Key words：Resistivity, Electromagnetic method, Direct current resistivity method

1. はじめに

海底熱水鉱床は、周りの堆積物に比べて低比抵抗を示すため、海底下比抵抗構造を調査できる人工電流源海洋電磁探査 (CSEM) 法は海底熱水鉱床の賦存量調査に有効である (Haroon et al., 2018)。海底熱水鉱床は、マウンドやチムニーとして海底面に存在する (マウンド型) のみならず、海底下に埋没したブライント型としても存在する。さらに、近年の掘削調査によって、ブライント鉱体がマウンド鉱体の直下に存在する共存型もあることがわかってきた (Koike et al., 2022)。このようなブライント鉱体とマウンド鉱体の共存型は沖縄トラフの代表的な海底熱水鉱床地域である伊是名熱水域および伊平屋熱水域で発見されたため、沖縄トラフでは一般的に存在するものと考えられる。このような背景があり、沖縄トラフの熱水域において海底熱水鉱床を探査する際は、ブライント鉱体とマウンド鉱体の両方をマッピングできる CSEM 法が必要である。しかし、マウンドとブライント鉱体の両方をマッピングできる CSEM 手法は確立されていない。そこで、本研究は、マウンドとブライント鉱体の両方をマッピングするための海底設置型電場データ (OBE) 受信機および曳航式電磁データ受信機 2 種類の受信機を使用する CSEM 手法を開発した。本手法は、マウンド鉱体に感度が高い曳航受信機データとブライント鉱体に感度が高い OBE 受信機データを組み合わせることでブライント鉱体とマウンド鉱体の両方をマッピングできる。

2. 仮想データへの適用結果

仮想データ・モデルを用いた実験により提案する手法の

有効性を検証した。仮想モデルは $0.2 \Omega\text{m}$ のマウンド型およびブライント型の海底熱水鉱床を模した低比抵抗異常体が $1 \Omega\text{m}$ の海底堆積層中に存在するものを考えた (図 1)。海底面の深度は $z=1000 \text{ m}$ とし、海面を $z=0 \text{ m}$ と設定した。海水および空気の比抵抗は、 $0.3 \Omega\text{m}$, $10^8 \Omega\text{m}$ とした。曳航受信機は送信機から 135 から 190 m 後方に複数台設置されたとし、一方、OBE 受信機は、6 台が海底に設置されたとした。使用したデータの周波数は 0.125 , 0.375 , 0.625 Hz である。このモデルから順解析を行い得られたレスポンスにガウシアンノイズを加えて仮想データを作成した。三次元 Occam 逆解析コード (Ishizu et al., 2022) を本仮想データに適用し海底下比抵抗モデルを推定した。

既存の手法では、曳航受信機のみまたは OBE 受信機のみを用いてきた。本数値実験の結果、曳航受信機型のみを使う方法では、マウンド型鉱体は真のモデルに近く再現できたが、ブライント鉱体は再現できなかった (図 1)。海底受信機データのみでは、マウンド型鉱体とブライント鉱体ともに再現できたが、偽像とともに再現された。一方、提案手法を用いた結果では、マウンド型鉱体とブライント鉱体ともに真のモデルに近く再現できた。

3. おわりに

本研究は、マウンドとブライント鉱体の両方をマッピングするための OBE 受信機および曳航式電磁データ受信機 2 種類の受信機を使用する CSEM 手法を開発した。仮想データを用いたテスト結果により、本手法はマウンドとブライント鉱体の比抵抗構造を真の構造に近く再現できること

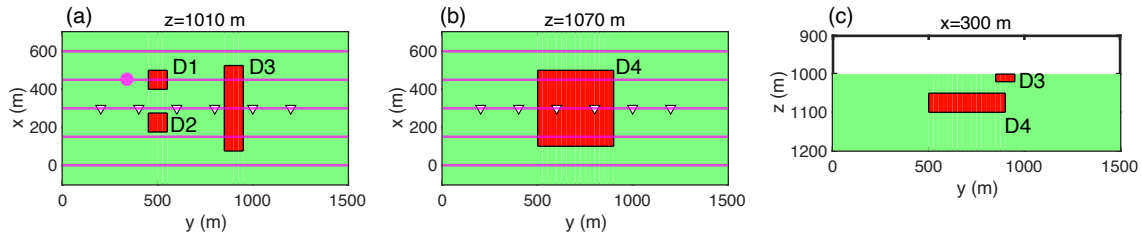
が明らかとなった。

文 献

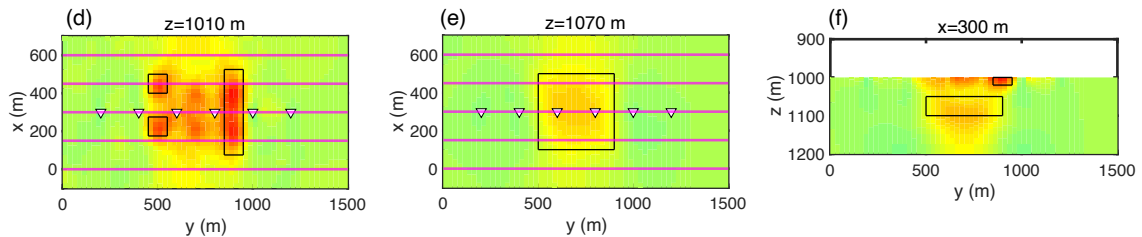
- Gehrmann, R. A. S., North, L. J., Graber, S., Sztikar, F., Petersen, S., Minshull, T. A., & Murton, B. J. (2019). Marine mineral exploration with controlled source electromagnetics at the TAG hydrothermal field, 26° N Mid - Atlantic Ridge. *Geophysical Research Letters*, 46(11), 5808-5816.
- Haroon, A., Hölz, S., Gehrmann, R. A., Attias, E., Jegen, M., Minshull, T. A., & Murton, B. J. (2018) Marine dipole-dipole controlled source electromagnetic and coincident-loop transient electromagnetic experiments to detect seafloor massive sulphides: Effects of three-dimensional bathymetry. *Geophysical Journal International*, 215(3), 2156-2171.

- Ishizu, K., Siripunvaraporn, W., Goto, T. N., Koike, K., Kasaya, T., & Iwamoto, H. (2022) A cost-effective three-dimensional marine controlled-source electromagnetic survey: exploring seafloor massive sulfides. *Geophysics*, 87(4), 1-23.
- Koike, K., Yono, O., de Sá, V. R., Tomita, S. A., Nozaki, T., Takaya, Y., & Komori, S. (2022). Effectiveness of neural kriging for three-dimensional modeling of sparse and strongly biased distribution of geological data with application to seafloor hydrothermal mineralization. *Mathematical Geosciences*, 54(7), 1183-1206.

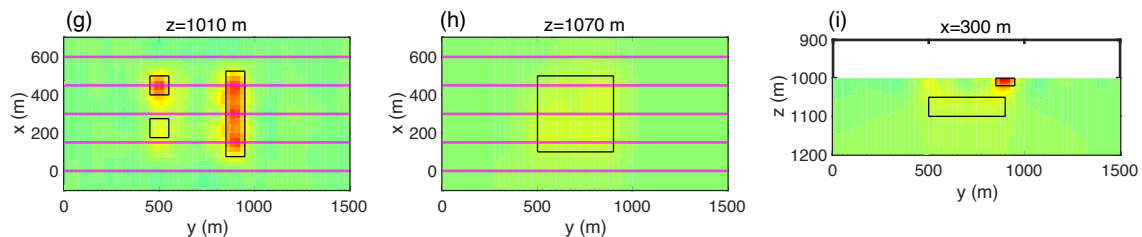
True model



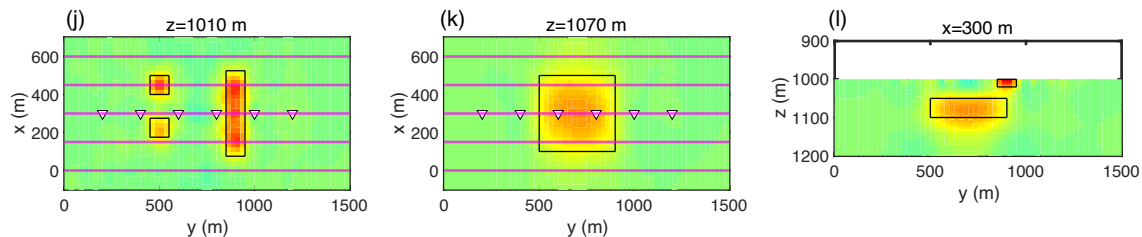
OBE data



Towed data



OBE + towed data



▽ OBE receiver
— Towing line
— True anomaly
● Transmitting point for Figure 5

0.1 0.2 0.3 0.5 0.8 1.3 2.2 3.6 6 10
Resistivity (Ω m)

第1図 数値実験に使用した比抵抗モデルと逆解析結果. ピンクの線は、曳航送受信機の測線、三角印は受信機的位置を示す. 仮想モデルは 0.2Ω m のマウンド型およびブライント型の海底熱水鉱床を模した低比抵抗異常体が海底堆積層中に存在するものを考えた.

鉱石試料分析データの多変量解析による日本の熱水鉱床の化学組成的特徴とその生成要因の解釈

江夏 道晴*・柏谷 公希*・小池 克明*

Chemical composition features of hydrothermal deposits in Japan through multivariate analysis of ore sample data and interpretation of their generation factors

Michiharu Enatsu*, Koki Kashiwaya* and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-225, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: enatsu.michiharu.56v@st.kyoto-u.ac.jp (Enatsu)

キーワード：熱水鉱床，主成分分析，独立成分分析，対数比変換，元素移動

Key words: Hydrothermal deposit, Principal component analysis, Independent component analysis, Logratio transformation, Element migration

1. はじめに

近年，世界的な経済発展や技術革新に伴う需要の急増により，金属資源の供給リスクが顕在化しており，新たな鉱床の探査・開発が重要である．新規鉱床の探査・開発には生成プロセスとその要因についての理解が必要不可欠で，そのために，種々の分析データをもとにした数理統計解析や機械学習を駆使したデータの特徴抽出法が注目されている．なかでも多変量解析による次元圧縮は多次元のデータにおいて，直観的に理解が難しい隠れた構造を見出すための有効な手段で，鉱床学の分野においてもこの手法が適用されている．例えば Makvandi et al.(2016)はカナダの Izok Lake 鉱山と Halfmile Lake 鉱山の磁鉄鉱を対象に化学組成データの主成分分析を行った結果，対象地域にマグマ由来の磁鉄鉱と熱水由来の磁鉄鉱が共存することを見出した．しかしこのような多変量解析を用いた研究例は，多くても数カ所程度の鉱山を対象としており，対象が広範囲にわたった例は見当たらない．

そこで本研究では，日本に存在する金属鉱床の鉱石試料を可能な限り収集し，化学組成データの主成分分析と独立成分分析を行い，化学組成的特徴を抽出した．さらに，鉱物組成データ，薄片試料観察，流体包有物分析の結果を組み合わせ，鉱床生成のプロセスの解明を目指している．

2. 分析対象試料

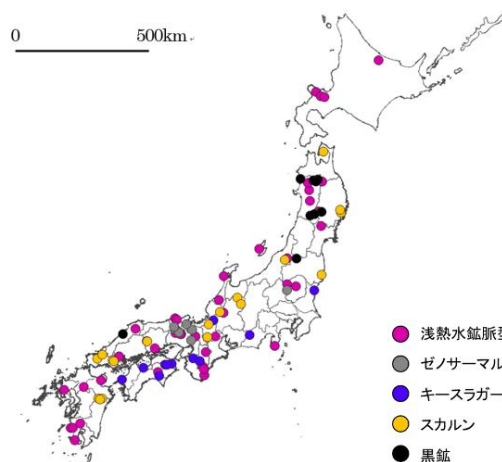
本研究では，京都大学総合博物館に収蔵されている鉱石から日本の 94 鉱山について，鉱山ごとに 1~5 個の鉱石を選び，合計 286 個の試料について分析を行う．分析した鉱山の鉱床タイプは浅熱水鉱脈型鉱床，ゼノサーマル型鉱床，キースラガー，スカルン鉱床，黒鉱型鉱床といずれも熱水鉱床である．第 1 図に対象とした鉱山の分布を示す．

はじめに，鉱石の一部をカッターで切断し，粉砕機を用いて切り出し部分を粉末化する．作成した粉末試料について鉱物組成分析を XRD (X 線回折分析装置)，化学組成分析を XRF (蛍光 X 線分析装置) と ICP-MS (誘導結合プラズマ

質量分析) を用いて行った．また，無色鉱物が豊富に含まれる 15 試料に関して，流体包有物の均質化温度を測定し，鉱物形成時の熱水温度推定を行った．さらに，薄片試料を作成し，EDX 搭載の走査型電子顕微鏡を用いた元素濃度マッピングによる鉱物同定を行い，分析に使用した試料における鉱物の分布形態を把握した．

3. 多変量解析による次元圧縮

主成分分析と独立成分分析は，ともに高次元のデータ空間から隠れた構造を見出すための多変量解析手法である．主成分分析は第一主成分の分散が最大化するように設定し，続く主成分はそれまでに得られた主成分と直交する制約条件のもと，分散が最大となる変数を決定する手法である．一方で独立成分分析は統計的に独立で，非ガウス性を持つ特徴を抽出する手法である．本研究では熱水活動に関連する 19 元素の元素濃度データに対し，主成分分析と独立成分分析を行った．その際，化学組成データのもつ定数制約を解消するために相対対数比変換を行った．規格化変数



第 1 図 分析対象の鉱山分布と鉱床タイプ

として熱水変質の際に移動性が低く、元素移動の基準となる Al の元素濃度データを用いた。

4. 結果と考察

4.1 主成分分析

主成分分析では第 1 から第 4 主成分までに解釈し得る地化学的な特徴が現れた。結果の例として第 1 主成分負荷量を第 2 図に示す。また、第 4 主成分までの累積寄与率は約 66%であった。以下に第 4 主成分までの解釈をまとめる。

第 1 主成分は酸性熱水によって溶脱される K, Mg(Werner, 1984)の主成分負荷量が負であるのに対し、その他の元素の多くが大きく正であるため、「酸性熱水による元素の溶出」と「元素の付加の程度」の 2 つの情報を持つと解釈した。

第 2 主成分は Si, Co, W の負荷因子量が大きく正である。Co について、国内のコバルト鉱は石英や灰鉄輝石と共生することが知られていること、W は鉱物組成分析の結果より鉄重石 $\text{Fe}(\text{WO}_4)$ や灰重石 $\text{Ca}(\text{WO}_4)$ として検出され、明延・生野鉱山等の国内の鉱山では石英脈中に鉄重石や灰重石等のタングステン鉱物が存在していること (Ishihara and Chappell, 2012), さらに石英脈を豊富に含む熱水鉱脈型鉱床の主成分得点が高いことから第 2 主成分を、「石英形成に伴う元素移動に関する指標」とであると解釈した。

第 3 主成分は O, Mg, Si, Mn, Ca の負荷因子量が大きく正である。スカルン鉱床は炭酸塩岩と貫入花崗岩類の接触交代反応によって生成される。その際、母岩となるのは石灰石 CaCO_3 および苦灰岩 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ が一般的である (Uchida and Nakano, 2018)。また、Mn は Ca と交代反応を示し、ペブス石等の Mn を含むスカルン鉱物を形成することから、PC3 は「スカルン鉱物の生成の有無を表す指標」と考えられる。スカルン鉱床の主成分得点が高いこともこの解釈と整合する。

第 4 主成分は Fe, Co, Cu, Ni の負荷因子量が大きく負である。XRD の鉱物組成結果では黄鉄鉱や黄銅鉱が多くの試料で検出されたこと、イオン半径が近いことから Ni は黄銅鉱 CuFeS_2 の銅、Co は黄鉄鉱 FeS_2 や黄銅鉱の Fe に置換されること (Ito, 1976), さらに薄片試料において黄銅鉱と黄鉄鉱が隣接して存在している例が多く観察されたことから、第 4 主成分は「黄鉄鉱・黄銅鉱形成に伴う元素移動」を表す指標と解釈した。

4.2 独立成分分析

主成分分析では抽出できなかった情報の検出を目的に、自然勾配法 (Amari et al., 1998) による独立成分分析を行った。地化学的な特徴が見られた第 1 独立成分と第 6 独立成分の負荷量を第 3 図に示す。第 1 独立成分では多くの元素における負荷量が正であり、第 6 主成分は K, Mg の負荷量が負であった。これらの特徴から主成分分析では第一主成分として得られた 2 つの情報「酸性熱水による元素の溶出」と「元素の付加の程度」が、独立成分分析により分離でき、K と Mg の溶脱の大きさがより明瞭になったと考えられる。

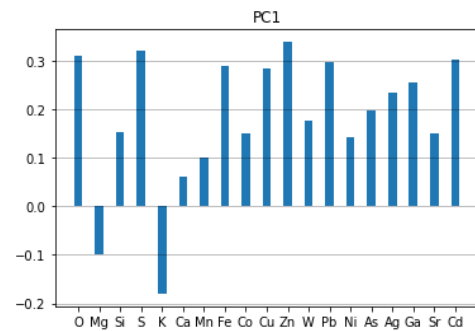
5. まとめ

本研究では、日本の熱水鉱床における化学組成的特徴の抽出を目的とし、94 鉱山からの 286 個の鉱石試料の分析データの多変量解析を行い、鉱物組成データや薄片観察等を組み合わせて、特徴形成の要因を考察した。主成分分析と独立成分分析の結果から、熱水鉱床の化学組成の主な生成要因は「酸性熱水による元素の溶出」、「元素の付加の程度」、「石英形成に伴う元素移動」、「スカルン鉱物の生成の有無」、および「黄鉄鉱・黄銅鉱形成に伴う元素移動」であることを明らかにできた。

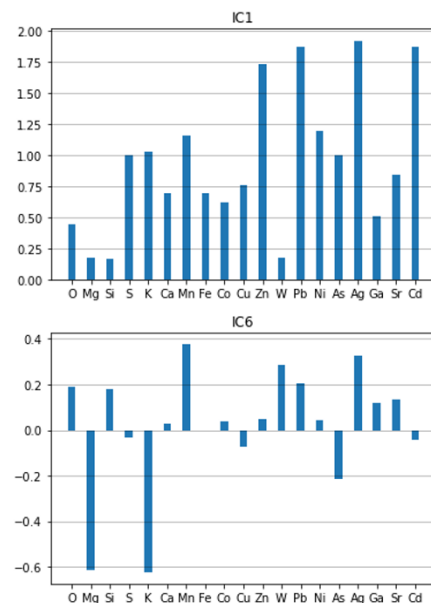
謝辞：本研究のために貴重な鉱石試料を提供いただいた京都大学総合博物館に深甚の謝意を表したい。

文献

- Amari, S. (1998) Natural gradient works efficiently in learning. *Neural Computation*, vol. 10, no. 2, pp. 251-276.
- Ishihara, S., Chappell, B. W. (2012) Petrochemistry of the Late Cretaceous-Paleogene igneous rocks in the Ikuno-Akenobe mine area, Southwest Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 63, pp.181-202.
- Ito, S. (1976) Geochemical study of bedded cupriferous pyrite deposits in Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 27, pp. 245-377.
- Makvandi, S., Ghasemzadeh-Barvarz, M., Beaudoin, G., Grunsky, E., McClenaghan, M. B., Duchesne, C. (2016) Principal component analysis of magnetite composition from volcanogenic massive sulfide deposits. *Ore Geology Reviews*, vol. 72, pp. 60-85.
- Ishihara, S., Chappell, B. W. (2012) Petrochemistry of the Late Cretaceous-Paleogene igneous rocks in the Ikuno-Akenobe mine area, Southwest Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 63, pp.181-202.
- Uchida, E., Nakano, T. (2018) Approach to skarn deposits. *Chikyukagaku (Geochemistry)*, vol. 52, pp. 149-169.
- Werner, F. G. (1984) Mass transfer in hydrothermal alteration systems—A conceptual approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 48, pp.2693-2711.



第 2 図 各元素の第 1 主成分負荷量



第 3 図 各元素の第 1 と第 6 独立成分(IC1 と IC6)負荷量

反応輸送シミュレーションによる海底熱水鉱床の生成モデリング

富田昇平*・小池克明**・後藤忠徳***・鈴木勝彦****・笠谷貴史****

Generation modeling of seafloor hydrothermal deposit through reactive transport simulation

Shohei Albert Tomita*, Katsuaki Koike**, Tada-nori Goto***, Katsuhiko Suzuki**** and Takafumi Kasaya****

*大林組技術研究所地盤技術研究部 Geotechnical Engineering Department, Technology Research Institute, Obayashi Corporation, 4-640 Shimokiyoto, Kiyose, Tokyo, 204-8558, Japan.

E-mail: tomita.shohei@obayashi.co.jp

**京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.

*** 兵庫県立大学大学院生命理学研究科 Graduate school of Life science, University of Hyogo, 3-2-1, Koto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo 678-1297, Japan.

****海洋研究開発機構 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2-15, Natsushima-cho, Yokosuka-city, Kanagawa, 237-0061, Japan.

キーワード: TOUGHREACT, 水-岩石反応, 化学反応, 熱水循環, 鉱物沈殿

Key words: TOUGHREACT, Water-rock interaction, Chemical reaction, Hydrothermal fluid circulation, Mineral precipitation

1. はじめに

海底熱水鉱床は、その多量の埋蔵量と高い金属品位から、近未来の重要な採掘ターゲットとみなされている。日本周辺海域では、沖縄トラフ海域や伊豆・小笠原海域において海底熱水鉱床の徴候が数多く確認されており、純国産資源として期待されている。海底熱水鉱床の開発を実現するためには、科学的な成因論に基づいて調査候補地を絞り込む方法を確立することが重要となっている。

近年、海底熱水域である沖縄トラフ伊是名海穴 Hakurei サイトを対象とした海底掘削により、塊状硫化鉱物の鉱体を胚胎する海底下の地質構造が明らかとなった (Nozaki et al., 2021)。また、熱水循環を考慮した熱水流動シミュレーションにより、鉱床の形成を引き起こす具体的な物理条件（熱水の温度・圧力・相状態、流体流動）が明らかにされた (Tomita et al., 2020)。しかしながら、海底熱水鉱床の形成プロセスは、熱の流れ、流体の流れ、および化学反応が組み合わせられた複雑なプロセスであるが、これら3つの側面を統合し、包括的に検討した例はこれまでになかった。そこで本研究では、上記3つの観点から海底熱水鉱床の形成プロセスを明らかにすることを目的に、伊是名海穴 Hakurei サイトをケーススタディとして、熱-水-化学 (THC) 連成解析手法である反応輸送シミュレーションを適用した。

2. 研究方法

反応輸送シミュレーションでは、熱と気液二相流の三次元流れおよび溶質の輸送と化学反応（鉱物の溶解・沈殿反応など）を考慮した解析が可能な TOUGHREACT V4.13-

OMP (Sonnenthal et al., 2021) を用いた。対象領域として、温度検層や熱流束測定、海底掘削、噴出熱水の化学組成分析などが行われている中部沖縄トラフに位置する伊是名海穴 Hakurei サイトを選んだ。

反応輸送シミュレーションでは、はじめに現地観測では明らかにできない深部熱水の化学組成を推定するため、海水が海底下を流下して熱水となるまでの過程をモデル化し、シミュレーションを行った。次に、推定した深部熱水を用いて、熱水が深部から上昇し海底面から噴出することで鉱床が形成される過程をモデル化し、シミュレーションを行った。以下では、これら2つのシミュレーションの概要について述べる。

2.1 深部熱水の化学組成の推定

深部熱水の化学組成を推定するため、高さ 5 km、幅 10 m、奥行き 10 m の 1 次元数値モデルを作成した。グリッド分割数は 50 であり、各セルの厚さは 100 m とした。岩石の物性値は、伊是名海穴の掘削データ (Kumagai et al., 2017) を参考に、間隙率 20%、浸透率 $1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、密度 2750 kg/m^3 、熱伝導率 $1.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、熱容量 $1000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ とした。

海水が上端（海底面）から流下し、下端において 350°C まで加熱される過程を再現するため、初期条件として上端の流体圧を 30 MPa、下端の流体圧を 25 MPa としてその間は均等に勾配を付けて流体圧を与え、初期温度は下端を除く全域で 4°C とし、下端は 350°C とおいた。境界条件として、上端から 4°C の海水を $3.0 \times 10^{-5} \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ の割合で与え、下端は温度圧力一定境界とし、下端で 350°C まで加熱されるように、全てのセルにおいて 1 W/m^2 の熱流束を与えた。

また、化学条件として、初期間隙水および上端に注入する流体は海水の化学組成を与えた。初期母岩は、Hakurei サ

トで採取された軽石の全岩化学組成（山崎ほか，2018）を参考に流紋岩の化学組成を与え，曹長石 40.4%，石英 34.56%，カリ長石 11.6%，灰長石 7.45%，鉄雲母 4.61%，その他白雲母，金雲母，角閃石，輝石がそれぞれ 1%未満と設定した．また，二次鉱物として硬石膏，カオリナイト，緑簾石，クリノクロア，滑石，モンモリロナイト，イライト，ダフナイト，閃亜鉛鉱，黄鉄鉱を考慮した．以上の条件のもと，5000年間の反応輸送シミュレーションを行った．

2.2 海底熱水鉱床の形成モデリング

熱水の上昇に伴う減圧，それに起因した沸騰を再現するため，高さ 300 m，幅 10 m，奥行き 10 m の 1 次元垂直数値モデルを作成した．グリッド分割数は 30 であり，それぞれのグリッド幅は 10 m とした．初期圧力は上端を除いて 19 MPa とし，上端は 16 MPa（Hakurei サイト海底面の水深約 1600 m に相当）とし，初期温度は全域で 345°C と設定した．境界条件として，底部から約 352°C の熱水を 1.0 g/s・m² の割合で与え，上端は温度圧力一定境界とした．

化学条件として，初期間隙水および下端から注入する熱水の化学組成は 2・1 節のシミュレーションで得られた化学組成を与えた．それ以外の条件は，2・1 節のモデルの条件と同じである．以上の条件下で，1000 年間の解析を行った．

3. 結果および考察

3.1 深部熱水の化学組成の推定

シミュレーションの結果，水-岩石反応に伴って流体の化学組成が以下のように変化することが明らかとなった（第 1 図）．概ね 100°C 以下の低温領域では，Mg を含有するフィロケイ酸塩鉱物の多くが沈殿し，流体中の Mg 濃度が低下するとともに pH が低下した．85–200°C の領域では，温度上昇に起因して硬石膏が沈殿し，Ca と SO₄²⁻ が岩石に固定された．100°C 以上の温度領域になると，緑簾石が沈殿をはじめ，HS⁻ が流体中に添加された．高温になるにつれて流体の pH が低下したことにより，Fe，K，Zn を含有する鉱物が徐々に溶解し，流体中のそれらの濃度が上昇した．

3.2 海底熱水鉱床の形成モデリング

シミュレーションの結果，熱水の上昇に伴って圧力が低下し，海底面付近で沸騰が生じること，および沸騰に伴って二酸化炭素の脱ガスが生じ，それに付随して pH が上昇することが示された．また，pH の上昇に起因して，沸騰領域で硫化鉱物が急激に沈殿することがわかった（第 2 図，第 3 図）．これらの硫化鉱物の沈殿量は，海底掘削で確認された沈殿量と整合的であった．また，伊平屋北海丘を対象とした熱水流動シミュレーションでは，キャップロックの形成に伴って海底下での沸騰が誘発され，キャップロック下部に鉱床が形成されることが示唆されている（Tomita et al., 2020）．以上の結果・考察から，熱水の沸騰は高品位鉱化帯形成に最も重要なプロセスであると考えられる．

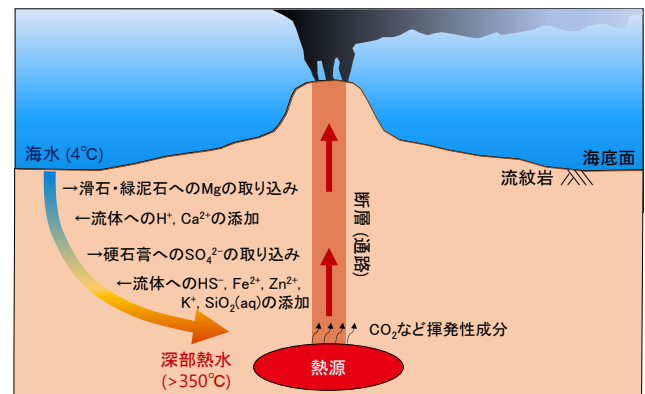
4. まとめ

伊是名海穴 Hakurei サイトを対象として，海水が流下して熱水となる過程を再現し，深部熱水の化学組成を推定するとともに，深部熱水が上昇して海底面付近で鉱床を形成する過程をシミュレーションした．その結果，熱水の上昇に伴って圧力が低下し，海底面付近において沸騰が生じ，その沸騰に起因して二酸化炭素の脱ガスおよび pH の上昇が誘発され，沸騰領域において硫化鉱物が著しく沈殿することがわかった．今後の課題としては，反応-輸送シミュレーションを 2 次元に

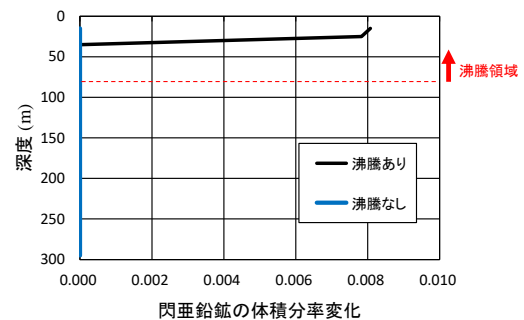
拡張し，観測データと比較することにより，鉱化帯形成プロセスについてより詳細な検討を行うことがあげられる．

文献

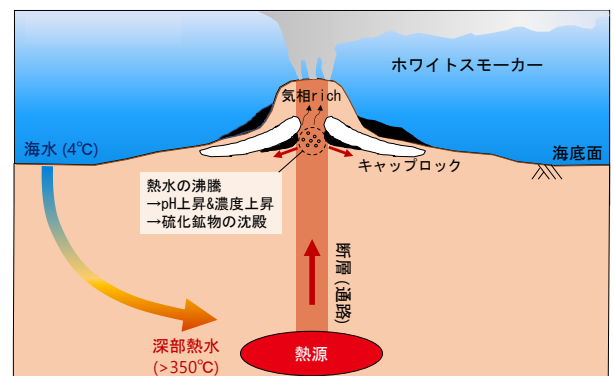
- Kumagai, H. et al. (2017). Cruise Report SIP-HOT II "Explorer" CK16-05 (Exp. 908), JAMSTEC.
- Nozaki, T. et al. (2021). Subseafloor sulphide deposit formed by pumice replacement mineralisation. *Sci. Rep.*, 11(1), 8809.
- Sonnenthal, E. et al. (2021). TOUGHREACT V4.13-OMP and TReactMech V1.0 Geochemical and Reactive-Transport User Guide. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Tomita, S. A. et al. (2020). Numerical Simulation-Based Clarification of a Fluid-Flow System in a Seafloor Hydrothermal Vent Area in the Middle Okinawa Trough. *Geophys. Res. Lett.*, 47(20).
- 山崎ほか (2018). 海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域絞り込み手法の開発：戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「次世代海洋資源調査技術」における産総研地質調査総合センター (GSJ) の研究開発成果，地質調査研究報告，69(6)，265–303.



第 1 図 水-岩石反応による流体の化学組成変化の概念図



第 2 図 沸騰ありなしモデルにおける閃亜鉛鉱の沈殿量の推移．赤い破線は沸騰領域を表す．沸騰ありモデルにおいて著しく閃亜鉛鉱が沈殿していることがわかる．



第 3 図 反応輸送シミュレーションに基づく鉱床成熟期（キャップロック形成後）における鉱化帯形成プロセスの概念図

熱水システムのモデリングのための Physics-informed ニューラルネットワークの開発

石塚師也*・嶋章裕**・林為人*

Development of a physics-informed neural network for modeling of hydrothermal systems

Kazuya Ishitsuka*, Akihiro Shima** and Weiren Lin*

*京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻

Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University
C-1-108 Kyoto University Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan.

E-mail: ishitsuka.kazuya.4w@kyoto-u.ac.jp

**京都大学大学院工学研究科都市社会学専攻 (現 日本電気株式会社)

Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University
C-1-118 Kyoto University Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan.

キーワード: ニューラルネットワーク, 熱水システム, 温度, 圧力, 浸透率

Key words: Neural network, Hydrothermal systems, Temperature, Pressure, Permeability

1. はじめに

火山地域や地熱地域の熱水流動は、地下の温度や圧力といった状態量や浸透率などの地殻物性値の分布に影響を受ける。そのため、熱水システムの理解や地熱資源の開発において、これらの分布を把握することは重要である。しかしながら、地下を直接的に計測できるのは、坑井が掘削された位置のみであり、これらの限られた計測データから地下の温度や圧力、浸透率等の分布をモデル化する手法の開発が求められる。

このようなモデル化において、一般的に数値シミュレーションが用いられる。計測されたデータを基に数値シミュレーションの物性値や境界条件を調整する手法は、数値シミュレーションのキャリブレーションと呼ばれる。一方、近年では、ニューラルネットワーク等の機械学習を用いた方法が提案され、成果を挙げつつある (Ishitsuka et al., 2018)。機械学習を用いることで計測データを基に、より少ない仮定でモデル化を行うことができる点が特徴である。しかしながら、熱水システムのような物理的な現象をモデル化の対象とした場合、機械学習によって予測されたモデルが物理的な法則を満たすかどうかを述べることは難しいという課題があった。

そのため、本研究では、物理法則で得られた Physics-informed ニューラルネットワーク (PINN) を用いて熱水システムの温度、圧力、浸透率をモデリングする手法を開発した。PINN は、Raissi et al. (2019) で提案された手法で、ニューラルネットワークを用いて偏微分方程式で記述される物理法則を満たすような予測を得る手法である。また、開発した手法は、実際の地熱地域を模擬したデータを用いて検証を行った。この検証において、温度のモデル化精度は良好であるものの、坑井から離れた位置において

は、浸透率の分布を適切にモデル化することは難しいことが分かった。そのため、既知の地質・地球物理データから解釈される浸透率構造を事前学習し、この学習済ネットワークを用いて転移学習することで、この課題を解決できるか検討した。

2. 手法の概要および検証用データ

3.1 Physics-informed ニューラルネットワーク

PINN は、損失関数に偏微分方程式で記述される物理法則と境界条件を組み込むことによって、物理法則に従う予測を可能とする。本研究では、物理法則として、定常状態の熱水流動の質量保存則とエネルギー保存則を用いた。また、状態方程式として、純水の単相状態を仮定した。これらの方程式は、定常状態における熱水シミュレーションでも用いられるものである。境界条件は、Dirichlet 境界条件と Neumann 境界条件のどちらも考慮できるようにした。また、ニューラルネットワークのアーキテクチャとして、4層かつ各層 50 ノードの全結合型ニューラルネットワークを用い、入力を座標値とし、出力を温度、圧力、浸透率とした。

また、転移学習では、既存の地質データや地球物理データから、真の浸透率分布とは同一ではないが、類似している数値モデルを作成できるとし、数値モデルを事前学習してから、転移学習によって一部のネットワークを学習した。

3.2 検証に用いた数値モデル

検証には、インドネシアの Lahendong 地熱地域 (Brehme et al., 2016) を模擬したモデルを用いた。Lahendong 地域の浸透率構造は高傾斜の断層に規定されていることが知られており、断層に挟まれた領域は浸透率が周囲よりも高くなっている。この大局的な地質構造を参考に、各地質ブロックの浸透率の値や境界条件は本研究で独自に設定した。

また、転移学習を応用した手法の検証には、一般的な地熱地域を単純化した数値モデルを用いた。なお、定常状態の温度と圧力の計算は TOUGH2 (Pruess et al., 1999) を用いて行った。この数値モデルから、坑井位置を仮定し、その位置での温度、圧力、浸透率を疑似的な計測データとした。仮定した坑井は、地表から大よそ等間隔で、鉛直方向に掘削されているとした。

予測値の誤差を定量化するため、坑井を仮定した深度区間を内挿深度区間、それよりも深部の深度区間を外挿深度区間として、パーセント誤差で評価を行った。

$$E = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{\text{ans},i} - x_{\text{pred},i})^2}{\sum_{i=1}^N x_{\text{ans},i}^2}} \quad (1)$$

ここで、 x_{ans} および x_{pred} は、疑似データおよび予測値（温度、圧力、浸透率の対数値のいずれか）を表す。初期値を変えて 10 試行を行い、誤差の平均値を用いた。

3. 結果および考察

3.1 PINN で予測した温度・圧力・浸透率分布

Lahendong 地域を模擬した数値モデルを対象に PINN で予測した温度、圧力、浸透率を第 1 図に示す。これらの予測した物理量において、温度や圧力については、数値モデルの分布を大よそ再現できていることが分かる。一方、浸透率の分布は全体の傾向を予測できているものの、坑井が存在しない位置の地質境界を明瞭に予測することはできていない。

数値モデルと予測値とのずれを式(1)のパーセント誤差で定量化したところ、温度の内挿および外挿深度区間の誤差は、1.6%と 3.4%であり、圧力の内挿および外挿深度区間の誤差は、0.52%および 1.5%であった。また、浸透率の対数値の内挿および外挿深度区間の誤差は、それぞれ 0.82%と 2.1%であった。坑井データを基に分布の予測を行っている性質上、内挿深度区間と比較して、外挿深度区間の誤差が大きくなっていることが分かる。

PINN の予測値と比較を行うため、損失関数に物理法則や境界条件を考慮しないニューラルネットワークを用いて、同様に温度、圧力、浸透率の予測を行った。その結果、予測された温度の内挿および外挿深度区間の誤差は、1.6%および 7.8%であり、特に外挿深度区間において、物理法則および境界条件を用いることで温度の予測誤差が低減していることが分かる。また、圧力の内挿、外挿深度区間の誤差は 0.53%と 1.5%、浸透率の対数値の内挿、外挿深度区間の誤差は、0.69%および 2.0%であり、PINN と NN で大きな違いは見られなかった。

3.2 PINN への転移学習の応用

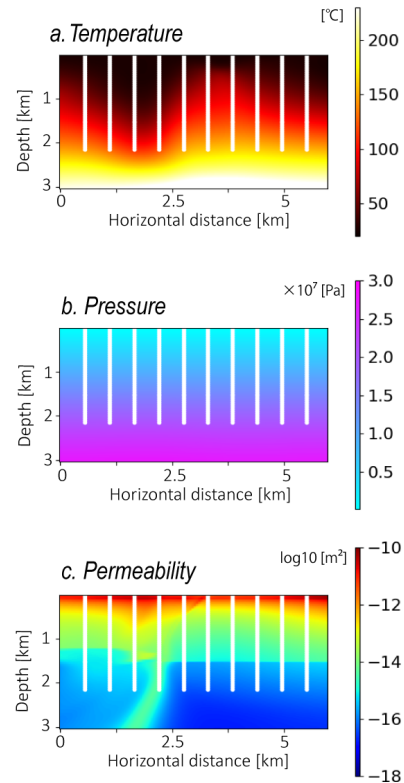
坑井が届いていない位置に特徴的な浸透率構造が存在する数値モデルに適用した場合、坑井データを用いるだけでは、その浸透率構造を十分に予測することができなかった。一方、転移学習を応用することで、それらの構造を予測することが可能となった。

具体的には、今回検証に用いた数値モデルでは、高傾斜の断層を模擬した高浸透率ゾーンと深部に位置する低浸透率の基盤には坑井が届いておらず、坑井データのみでは、これらの構造を予測することはできなかった。一方、類似する数値モデルを PINN で事前学習を行うことによって、これらの浸透率構造の存在を示唆することができた。

4. まとめ

本研究では、熱水システムをモデル化する physics-informed ニューラルネットワークを実際の地熱地

域を模擬した数値モデルを用いて検証した。この手法によって、物理的により妥当な温度、圧力、浸透率分布を得ることを示した。坑井データが存在しない位置での浸透率分布の予測精度は十分でないが、転移学習を応用することでこの課題を解決できる可能性を示した。



第 1 図 Physics-informed ニューラルネットワークで予測した a.温度、b.圧力、c.浸透率の分布。各図の白線は、坑井位置を表す。

文献

- Ishitsuka, K., Mogi, T., Sugano, K., Yamaya, Y., Uchida, T., Kajiwarra, T. (2018) Resistivity-Based Temperature Estimation of the Kakkonda Geothermal Field, Japan, Using a Neural Network and Neural Kriging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15, 1154–1158.
- Raissi M, Perdikaris P, Karniadakis GE. (2019) Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707.
- Brehme, M., Blocher, G., Cacace, M., Kamah, Y. (2016) Permeability distribution in the Lahendong geothermal field: A blind fault captured by thermal-hydraulic simulation, *Environ. Earth Sci.*, 75, 1088.
- Pruess, K, Oldenburg, CM, Moridis, GJ. (1999) TOUGH2 user's guide version 2. https://tough.lbl.gov/assets/docs/TOUGH2_V2_Users_Guide.pdf

謝辞

本研究の一部は JST ACT-X「AI 活用で挑む学問の革新と創成」(JPMJAX20A1) および JSPS 科研費 (23H01908) の支援を受けて行いました。感謝申し上げます。

「ちきゅう」の Post IODP に向けたデータベース構想

木戸 ゆかり・Adam Wspanialy・青池 寛・Sean Toczko*

New Database plan for “Chikyū” for Post IODP

Yukari Kido, Adam Wspanialy, Kan Aoike, and Sean Toczko*

* 国立研究開発法人海洋研究開発機構 JAMSTEC, 2-15 Natsushima cho, Yokosuka, Kanagawa. E-mail: ykido@jamstec.go.jp

キーワード: IODP, Post IODP, 地球深部探査船「ちきゅう」, データベース, 脆弱性試験
Keywords: IODP, Post IODP, D/V Chikyū, Database, Vulnerability Check

1. はじめに

昨年の GEOINFORUM-2022 にて、新たなデータベースのプロトタイプ構築の紹介をした(木戸ほか, 2022)。2005年に慣熟航海を迎えた地球深部探査船「ちきゅう」(以下、「ちきゅう」)は、2本建の地球科学データベースを構築し、国内外の研究者・技術者、コミュニティに広く利用され成果を発出してきた。1つは、国際深海科学掘削計画 (IODP) の枠組みで得られたデータを、国内外の研究者に提供するデータ公開サイト「sio7」(<https://www.jamstec.go.jp/sio7>)である(第1図)。航海ごとにIODP国際基準で定められた船上データをcsv, txt, 画像データとしてダウンロードできる仕組みになっている。もう一つは、「ちきゅう」船上で得られた科学成果データの一元管理用データベースシステム「J-CORES」である。取得した地質柱状のコア試料を分析装置と連動して、科学計測データ、X線CT画像データや全体あるいは半分に半割した写真データ、乗船研究者による記載データの電子化等が一元管理されている。いずれも運用開始から18年が経過し、アプリケーションの基盤設計からの見直し、機能拡張が必要となった。

2. データベースの仕様における脆弱性対策

いずれのデータシステムも、航海名や調査海域が既知であれば、必要なデータを探せるが、初めてサイトにアクセスする者には、極めてわかりづらく不親切なサイトである。「sio7」サイトは、データ分布、地図表示、データ相関、検索などのデータベース機能を有せず、国際的に利用されるデータ参照サイトとしては機能が不十分であった。システムの老朽化と運用機能の陳腐化により、新システムへの移行を検討し、フィジビリティスタディを行った。2023年3月に運用版データベースサイト「J-SODD」を構築した(第2図)。現在、外部公開準備を進めているので報告する。プロトタイプ構築中に生じた脆弱性問題により、外部公開に対する評価基準が厳しくなった。(1) 情報セキュリティの管理体制が問われるようになったこと。品質保証体制の証明書の提出の義務化。監視運用機能の実装化。(2) 万一、情報セキュリティインシデントが発生した際の対処法・体制の明文化。(3) ISO認証取得証明書の発行。(4) 情報取扱の通信やファイル保存の暗号化の徹底。(5) 作業端末のOSや作業環境の最適化。

取得データのモラトリアム期間終了後は、速やかに外部公開に進む流れが鈍化し、多重のセキュリティ対策が求められるようになった。

3. データベースの構成

3.1 「sio7」および「J-SODD」システム概要

第3図にシステム概要図を示す。現行データサイトである「sio7」も新たに構築した「J-SODD」データベースも、Firewallの外側にアプリケーション掲載の仮想サーバーが設置され、外部からインターネットを通してアクセスされる。一方、所内からは、管理用サーバーからのみアクセス可能とし、データサーバーとはNFSマウントするのが基本体制である。すべての脆弱性検査にパスし、情報システム部審査に通過して初めて外部公開が可能となる仕組みである。

3.2 J-CORES データベースシステム

コア試料の計測データが一元管理される「J-CORES」システムは、船上オフラインと陸上とミラーリング体制を組まれている。船上のオペレーションや計測が進行している間は、乗船研究者やコアキュレーター(コア試料の専門職人)が、ローカルネットワークを通じて、データ登録、追加、修正、保存ができる。航海終了後、オフラインで陸上げし、陸上サーバーにもミラーリングサイトが作成される。

3.3 ユーザーアクセス機能

いずれのデータベースサイトも、ユーザー管理機能としては、ユーザー情報(氏名、メールアドレス、国籍、所属等)を登録する機能を有している。管理者、ログインユーザー、一般ユーザー(未ログインユーザー)の3種類のユーザー権限を登録する。データ取得後1年間は、モラトリアム期間を設けているため、アクセス管理ができる。管理者は各ユーザーの管理、データの公開、非公開の設定を行うことができる。

4. データベースの特色

いずれのデータベースも、運用開始からすでに18年という年月が経過している。IODP国際運用の枠組みは、2024年後半から大きく変更になる。基盤設計からの見直し、脆弱性対策、機能拡張性、保守性、運用性を向上すること、可能な限りの運用コストの低減を目指して、2つのデータベースの再構築化が進められている。(1) 徹底したオープンソース

の利用, (2) 初級レベルの管理者によるカスタマイズの実現, (3) 後々の機能追加が容易となるような構成, をコンセプトとした. 異なる観点から掘削データの見直しや再解析が実現し, 新たな発見が期待できる. 構築中に脆弱性機能の見直し時期があたり, より頑強なシステムが Post IODP を支

えていくことにご期待いただきたい.

文 献

木戸ゆかり (2022) IODP「ちきゅう」の新しいデータベースの構築, GEOINFORUM-2022.

Data Index						
International Ocean Discovery Program						
NanTroSEIZE Stage 4: Plate Boundary Deep Riser: 4						
Proceedings						
Hole	LAT/LONG	WD (m)	Database	Whole core XCT	Split core image	Well logging
C0002Q	33°18.5070'N, 136°38.2029'E	1939.00	✓			✓
C0002R	33°18.5070'N, 136°38.2029'E	1939.00	✓			✓
C0002S	33°18.5070'N, 136°38.2029'E	1939.00	✓			✓
C0002T	33°18.5070'N, 136°38.2029'E	1939.00	✓	✓	✓	✓
C0024A	33°02.0430'N, 136°47.3991'E	3841.50	✓			✓
C0024B	33°02.0000'N, 136°47.3966'E	3843.50	✓	✓	✓	✓
C0024C	33°02.0000'N, 136°47.3966'E	3843.50	✓	✓	✓	✓
C0024D	33°02.0000'N, 136°47.3966'E	3843.50	✓	✓	✓	✓
C0024E	33°02.0000'N, 136°47.3966'E	3843.50	✓	✓	✓	✓
C0024F	33°02.0656'N, 136°47.3995'E	3839.50	✓	✓	✓	✓
C0024G	33°02.0108'N, 136°47.4030'E	3843.00	✓	✓	✓	✓
C0025A	33°24.0910'N, 136°20.1524'E	2011.00	✓	✓	✓	✓

Data Index						
See also data in the database for the same hole to refer related information.						
ORIGINAL	DATA	Type	File (length in bytes)	Remark		
ORIGINAL	DATA	Verification	358_C0024A_Main.htm (227326)	verification		
ORIGINAL	DATA	Survey data	358_C0024A_Survey_Report.xlsx (45148)	survey data		
ORIGINAL	DATA	Original Main Raw data (las)	358_C0024A_Main_Raw.las (3090577)	Main log		
ORIGINAL	DATA	Original ARC Raw data (las)	358_C0024A_Main_ARC_Raw.las (6682290)	ARC raw data		
ORIGINAL	DATA	Original data (dis)	358_C0024A_Main.dis (260904124)	Main log		
ORIGINAL	DATA	Original data (las)	358_C0024A_Main.las (37238781)	Main log		
ORIGINAL	DATA	Original Time base data (las)	358_C0024A_Main_Time.las (27009117)	Main Time log		
ORIGINAL	DATA	Verification: repeat 1	358_C0024A_Repeat1.htm (24874)	Repeat log: Repeat1_4127.00-4180.00m		
ORIGINAL	DATA	Original data: repeat 1	358_C0024A_Repeat1_ARC_Raw.las (254391)	Repeat log		
ORIGINAL	DATA	Original data: repeat	358_C0024A_Repeat1.dis (15735832)	Repeat log		
ORIGINAL	DATA	Original data: repeat	358_C0024A_Repeat1.las (3391358)	Repeat log		
ORIGINAL	DATA	Verification: repeat 2 mudline	358_C0024A_Repeat2.htm (1122265)	Repeat log: Repeat2_mudline		
ORIGINAL	DATA	Original data: repeat 2 mudline	358_C0024A_Repeat2_ARC_Raw.las (92120)	Repeat log		
ORIGINAL	DATA	Original data: repeat	358_C0024A_Repeat2.dis (4573792)	Repeat log		
ORIGINAL	DATA	Original data: repeat	358_C0024A_Repeat2.las (1122265)	Repeat log		
ORIGINAL	DATA	SLB processed eCaliper	358_C0024A_Processed_eCaliper.dls (36394992)	eCaliper		
ORIGINAL	DATA	SLB processed eCaliper	358_C0024A_Processed_eCaliper.kts (3558018)	eCaliper		
ORIGINAL	DATA	SLB processed SeismicVISION	358_C0024A_Checkshot_Report.xlsx (1085061)	SeismicVISION checkshot		
ORIGINAL	DATA	SLB processed SeismicVISION	358_C0024A_corr_stk_10-60Hz_verification.bt (49773)	SeismicVISION corr_stk_verification		
ORIGINAL	DATA	SLB processed SeismicVISION / corr_stk	358_C0024A_corr_stk_10-90Hz.sgy (162040)	sgy		
ORIGINAL	DATA	SLB processed SeismicVISION	358_C0024A_corr_stk_10-90Hz_verification.bt (49757)	SeismicVISION corr_stk_verification		
ORIGINAL	DATA	SLB processed SeismicVISION / corr_stk	358_C0024A_corr_stk_10-90Hz.sgy (162040)	sgy		

第1図 「sio7」データサイト例 (IODP 第358次航海)

Chikyu IODP Data Web Site

About Us Data Policy Links Map Search Data Search Data Detail Manual Login

① Expedition
all
Site
all
Hole
all
Keywords
enter a search string

② Data Columns (Up to 10)
AND OR
> Core Data
> Well Logging
> Mud Logging
> Time Series

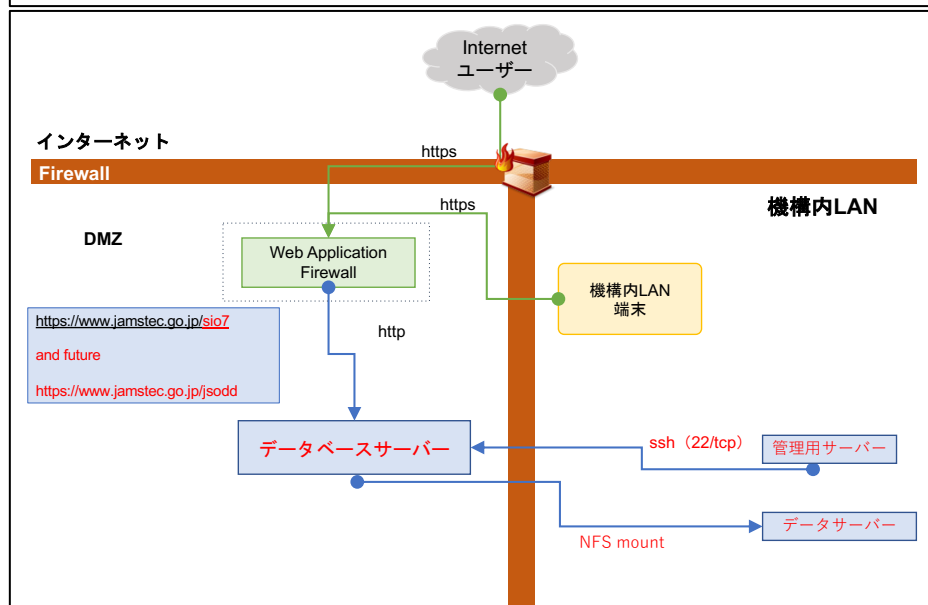
③ Clear Search

④ Google Maps GEBCO 2022

第2図 「J-SODD」データベースシステム概要図

- ① データ検索;
- ② 詳細検索;
- ③ クリアおよび検索ボタン;
- ④ マップ表示画面の掘削点表示

図中のカラーの点は, 掘削点を示す. 黄色い点は, 外部公開済み, 白い点は非公開を示す.



第3図 「sio7」データサイトおよび「J-SODD」データベースシステム概要図

位置情報が付された 5 万分の 1 岡山県地質図の配布について

能美 洋介*・田邊 信男**・深味義之**・水野 正行**・田中 元**・大嶋 優斗**・清水 英二**

Distribution of 1:50,000 Okayama Prefecture Geological Maps with location information

Yousuke Noumi*, Nobuo Tanabe**, Yoshiyuki Fukami**, Masayuki Mizuno**, Hajime Tanaka**, Yuto Oshima**, and Eiji Shimizu**

*岡山理科大学 Okayama University of Science, Okayama,700-0005, Japan. e-Mail:y_noumi@ous.ac.jp

**西部技術コンサルタント株式会社 Seibu Engineering Consultants Co., Ltd., Okayama, 700-0977, Japan. URL:http://www.seibuct.co.jp

キーワード： 5 万分の 1 岡山県地質図, 位置情報, GIS

Key words : 1:50,000 Okayama Prefecture Geological Maps, location information, GIS(Geographic Information System)

1. 1:50,000 岡山県地質図について

1:50,000 岡山県地質図は、西部技術コンサルタント株式会社の社会貢献事業の一環として、故光野千春岡山大学名誉教授と光野研究室の卒業生たちによって調査編集が行われ、2003年に全21図幅で初版が完成した。この地質図と説明書は、西部技術コンサルタントのホームページにPDF版のリンクがつけられて2008年に一般公開された。その後、2020年に改訂版が出され現在に至っている。初版公開以降、地質の研究者や地質コンサルタント、地方自治体関係者など多くの人にダウンロードされ利用されてきているが、近年、GISで利用できる形式も公開してほしいとする要望が多くなってきた。このため、発表者と西部技術コンサルタントは共同で、GISで利用できる形式の岡山県地質図について検討し、近日中の公開を予定するに至った。この発表では、新たに公開される予定の1:50,000岡山県地質図について紹介する。

2. 位置情報を付した地質図

現在公開中の1:50,000岡山県地質図は、地質本体と凡例を合わせた図面をPDFファイルで配信している(第1図)。この地質図は、日本測地系で刊行されていた時代の1:50,000地形図を背景地図として、その上に地層・岩石種ごとにレイヤーを置き、それぞれのレイヤーに土木CADで分布が描かれた。そして、その結果をPDFファイルとして出力した。したがって、この地質図のユーザーにとっては、紙に印刷された図面と同様の扱いである。

地質の研究者や技術者の間では、近年、GIS (Geographic Information System) が作業ツールとして一般的になってきた。それに伴い、岡山県地質図のGISデータの公開の意見が増えてきた。要望者の具体的な要求内容は明らかでないが、強く拡大したときに見える地形図とのずれや、3次元表示への適用などが想定される。

GISデータとして公開を議論するにあたり、いくつかのGISデータ形式を検討したが、地質記載事項の変更を容易にする方向は著作権など関係から時期早尚とする判断から、

公開の第1弾は位置情報を付した図面を配信することとした。位置情報を付けた地図等の図面は、GISを用いると、目的とする座標上に直接配置することができる。

3. 位置情報の与え方と出力結果の確認

1:50,000地形図はほぼ矩形の描画領域を持つ。地質図の各図幅の四隅のポイントに印をつけ、これをGCP (Ground Control Point) とした地質図ファイルを作成した。次にQGIS (使用バージョン: 3.24.3) のジオレファレンサに、上記地質図ファイルを読み込み、GCPを4カ所指定し、世界測地系 (JGD2000) の座標値を入力し、PNG画像として出力させた。日本測地系の座標値から世界測地系への変換は、国土地理院の新旧緯度・経度対照表を利用した。ジオレファレンサによる変形アルゴリズムは、元の地図がほぼ矩形なので“線形”とし、リサンプリング方法は“最近傍”を採用した。

ジオレファレンサによる地質図画像の出力結果を簡易GISソフトウェア“地図太郎 Plus”で表示させたものを第3図に示す。ただし、地質図の背景には、国土地理院の地図タイトル (1:25,000) を置いている。その上のレイヤーに描いた地質図 (西大寺・高松図幅の一部を拡大したもの) は、海岸線や地形変換の場所などを参考に地質図の重なり具合を見る限り、リファレンスされた位置に正しく置かれていると判断される

文 献

国土地理院 (2010) 5 万分の 1, 2.5 万分の 1 地形図の新旧緯度・経度対照表. <https://www.gsi.go.jp/MAP/NEWOLDBL/25000-50000/5233.html>.

岡山県内地質図作成プロジェクトチーム (2020) 改訂版岡山県地質図 5 万分の 1 図幅および説明書. 西部技術コンサルタント株式会社. 124P

QGIS Project (2022) 15.3 ジオレファレンサ. QGIS Documentation, https://docs.qgis.org/3.16/ja/docs/user_manual/working_with_raster/georeferencer.html

三次元大量点群データにおける点群 PNG の優位性

西岡芳晴*・北尾馨**

Advantages of Point Cloud PNG in 3D Massive Point Cloud Data

Yoshiharu NISHIOKA* and Kaoru KITAO**

* 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 Institute of Geology and Geoinformation, AIST, Tsukuba Central 7, 1-1, Higashi 1, Tsukuba Ibaraki, 305-8567, Japan. E-mail: y-nishioka@aist.go.jp

** 合資会社キューブワークス CubeWorks Inc., 4-1, Mizukino 2, Moriya, Ibaraki, 302-0121, Japan. Email: kitao@cubeworks.co.jp

キーワード：点群 PNG, 3D, ウェブ, 地図, LAS

Key words : Point cloud PNG, 3D, web, map, LAS

1. はじめに

近年、航空レーザー計測や移動計測車両の発達等により、高精度で大量の三次元点群データの収集が可能となった。公共事業等で収集された点群データは多くは各都道府県等で集約されるが、それらの有効活用を図ろうと全域の点群データをオープンデータとして公開する事業がすでに始まり、兵庫県、静岡県、和歌山県に続き長崎県も 2023 年 3 月より全県点群データの公開を開始している。しかし、それらのデータは膨大であるため、小さい領域に分割され LAS 形式やテキスト形式で公開される。実際に利用するには GIS 等が利用できる環境と知識が必要であり、利用できるユーザーは限定される。

一方、点群 PNG は大量の二次元/三次元点群データをウェブ上で高速に扱うためのファイルフォーマットとして考案された(西岡, 2021)。当初は、ボーリングデータなどの二次元上の計測データを扱うことが想定されていたが、仕様上は三次元点群データも扱える。本論では、大量の三次元点群を扱える他のフォーマット(LAS, 3D Tiles, Potree 形式, COPC)との比較を行い、それらに対する点群 PNG の有効性を検証する。

2. 点群 PNG

西岡(2021)では点群 PNG ver. 0.4 を紹介しているが、その後幾つかの改良が加えられ、現在の最新版は ver.0.6 である(西岡, 2023)。点群 PNG は画像フォーマット PNG 形式を用いて点群データを保持している。このため可逆圧縮が利用でき、ファイルサイズを抑えることができる。また、点群 PNG は WebGL を用いて処理しやすいように設計されている。点群 PNG は三次元のみではなく、二次元の点群データも扱うことができ、位置座標以外にも様々な属性データを扱うことができる。点群 PNG のベースは、PNG 形式を使って汎用的なレコードデータ扱うためのリスト PNG であり、このことを利用してラインデータを扱うこともできる。

3. 比較対象とした既存フォーマット

3.1 3D Tiles

3D Tiles は地図上の 3D コンテンツを表現するため規格であり、国際標準規格である OGC 標準の一つである。最新版は ver.1.0(2018/6/8)であり、検討したフォーマットの中では最も古く、すでに普及も進んでいる。前進は CesiumJS と

いうライブラリのフォーマットであり、ポイントデータ以外の 3D オブジェクトデータも含んでいる。圧縮機能は持たない。

3.2 Potree 形式

Potree は三次元点群データをブラウザ上で扱える点群表示ビューアーシステムであり、Potree が使用するフォーマットを本論では Potree 形式と呼ぶ。ファイルフォーマットの仕様は公開されていない。ポイントデータ専用であり、圧縮機能は持たない。

3.3 COPC

COPC は、LAZ 1.4 ベースのファイルフォーマットであり、LAZ は LAS を圧縮したファイルである。内部にクラスタ化された 8 分木構造を保有している。2021 年に ver.1.0 の仕様が開示され、今回検討したフォーマットの中では最も新しいものである。ポイントデータ専用であり、圧縮機能を有している。

4. テストデータの作成

各点群フォーマットの比較を行うために、富士山山頂剣ヶ峰付近のテストデータを作成した。データソースは「VIRTUAL SHIZUOKA 静岡県 富士山および静岡東部 点群データ」を使用した(静岡県, 2022)。東西 800m, 南北 600m の範囲で(第 1 図)、ポイント数は 47,164,058 点である。



第 1 図 テストデータの作成範囲

テストデータは富士山山頂剣ヶ峰付近の東西 800m, 南北 600 の範囲で作成した。背景は地理院地図の標準地図。

第1表 各点群フォーマットの計測結果

フォーマット	ファイルサイズ		ファイルロード時間 (秒)	点群表示時間 (秒)
	合計サイズ(byte)	比率		
LAS	1,603,578,201	100.0		
点群PNG	276,779,548	17.3	12.547	31.028
3D Tiles	711,521,378	44.4	45.646	148.000
Potree形式	1,651,215,926	103.0	76.902	19.106
COPC	530,468,855	33.1	24.651	9.172

LAS から点群 PNG への変換は JavaScript によりプログラムを作成して行った。Potree 形式への変換は PotreeConverter を使用した。COPC への変換は PDAL を使用した。3D Tiles への変換は PDAL を用いて LAS ファイルに空間参照系を付与し、その後 py3dtiles を用いて行った。

4. 計測

各点群フォーマットについて、ファイルサイズ、ファイルロード時間、点群表示時間の計測を行った。結果を第1表に示す。

4.1 ファイルサイズ

作成した各点群フォーマットのファイルサイズの比較を行った。第1表には LAS のファイルサイズに対する比率(%)も示す。

4.2 ファイルロード時間

各点群フォーマットについて、変換したすべてのファイルをロードする時間を計測した。計測に際して各点群フォーマット用にスクリプトを作成し、5回測定してその平均を値を求めた。

4.2 点群表示時間

各点群フォーマットについて、表示システムの起動から点群表示が完了するまでの時間を目視で計測した。計測は各点群フォーマットについて5回行い、その平均を値を求めた。点群 PNG は汎用の表示システムが存在しないため、計測のために独自に作成した(第2図)。3D Tiles は CesiumJS 上で測定した。Potree 形式は PotreeConverter が生成する表示システムを使用した。COPC は COPC 公開元がウェブ上で公開する表示システムを使用した。

5. 考察

ファイルサイズは検討したフォーマットの中で点群 PNG が最小となり、LAS ファイルに対して約 17.3%に圧縮された。これは点群 PNG が PNG の可逆圧縮を利用し、また、利用に直接関係するデータのみを保持しているためである。次いで、やはり圧縮機能を有している COPC が LAS の約 33.1%、不要なデータの削除を行っている 3D Tiles が LAS の約 44.4%となっている。Potree 形式は非圧縮であり、データもすべて保持し、かつ高速表示用のメタデータを追加するため元の LAS ファイルよりもファイルサイズは約 103.0%と逆に大きくなっている。ファイルロード時間はおおむねファイルサイズを反映した結果となっており、点群 PNG が最も高速にロードされている。以上の結果から、フ



第2図 計測に使用した点群 PNG 表示システム

ファイルサイズの減少、ファイルロード時間の短縮の点から、点群 PNG は他のフォーマットよりも優位性が高いと言える。

点群表示時間に関しては、点群 PNG は 3D Tiles よりは高速なもの、Potree 形式、COPC よりは劣っている。しかし、これは点群 PNG 及び 3D Tiles が全点を表示しているのに対し、Potree 形式及び COPC は一部のポイントのみを表示しているためである。Potree 形式及び COPC はいずれもデータ本体を巨大な1つのファイルに収め、利用時にはその一部を部分取得して表示するようにしており、描画の高速化を図っている。点群 PNG は圧縮アルゴリズムの関係上、部分取得が難しいため、点群 PNG の表示時間を短縮するにはタイル分割の導入が必要であると考えられる。

6. おわりに

点群 PNG は三次元大量点群データを扱うための既存フォーマットと比べて、ファイルサイズ・ロード時間の面で優位ではあるが、実際に扱う際にはタイル分割の導入が望ましいことが分かった。今後はそのようなシステムを試作し、利用の促進を図りたい。

文 献

- 西岡芳晴 (2021) ウェブアプリケーションで点群を高速に扱うための仕様“点群 PNG”の考案。情報地質, vol.32, no.2, pp. 39-42.
- 西岡芳晴 (2023) 点群 PNG ver. 0.6 仕様。シームレス地質図ラボ。 <https://gsj-seamless.jp/labs/pcpng/0.6/> (確認:2023/05/22)
- 静岡県 (2021) VIRTUAL SHIZUOKA 静岡県 富士山および静岡東部点群データ。 <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/shizuoka-2021-pointcloud> (確認:2023/05/22)

二次元点群展開処理手法の改良

北尾 馨*

Improvement of processing method for 2D point cloud mapping

Kaoru KITAO*

* 合資会社キューブワークス CubeWorks Inc., 4-1, Mizukino-2, Moriya, Ibaraki 302-0121, Japan. E-mail: kitao@cubeworks.co.jp

キーワード：点群, GPU, WebGL 2.0, Transform feedback, 行列

Key words: Point cloud, GPU, WebGL 2.0, Transform feedback, Matrix

1. はじめに

著者は北尾 (2020) において迅速測図約 170 万点の点群を, 北尾・西岡 (2022) において磁気異常補正值約 560 万点の点群をそれぞれ二次元のウェブ地図上に展開するアプリケーションを開発し, これらを紹介した. その後開発を重ね, 数千万点程度の点群を展開することが可能であることも確認している.

しかし技術の進展等もありこれまで採用していた処理手法等に改善の余地があることが判明した. 本件では, 従前の仕組みに各種改良を施した点群展開アプリケーションを開発して良好な動作を確認したので, その概要を紹介する.

2. アプリケーションの概要

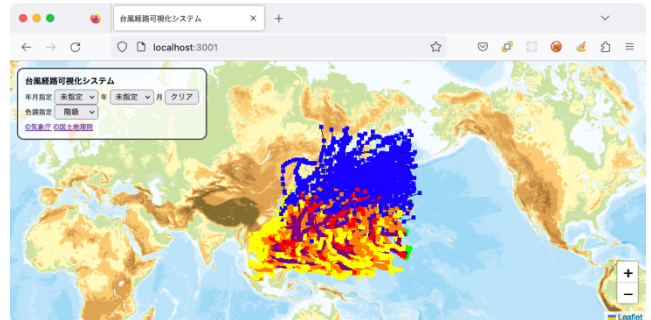
本件では気象庁が過去の台風資料として公開している台風位置表 (気象庁, 2023) のうち CSV 形式ファイルを利用して, 時系列の台風位置とその経路を二次元ウェブ地図上に展開するアプリケーションを開発した.

CSV 形式ファイルは台風の発生年を基準として 2001 年から 2022 年までの 22 点であり, 含まれる台風の総数は 538 件である. 各ファイルは見出し行に加えて 1 行 1 件で台風の位置と時刻および階級等の情報を格納し, その総数は 19,747 件である. 本件ではこれらのファイルから表示に使用する項目のみを抽出して新たな CSV 形式ファイルを作成した. 抽出した項目を表 1 に示す.

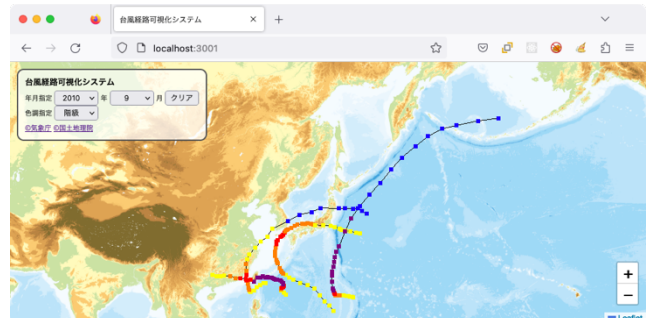
アプリケーションは起動時, 保持する全ての台風位置を点で, 点をつないで得られる台風の経路を線で描画し, 各点を当該位置における台風の階級に応じた色で着色している (図 1). 機能として台風の発生日による抽出が可能であり, 年または月またはその両方を指定して発生日がその条件に該当する台風を表示することができる. 図 2 に 2010 年 9 月に発生した台風のみを抽出して表示した例を示す.

第 1 表 アプリケーションで使した台風情報の項目

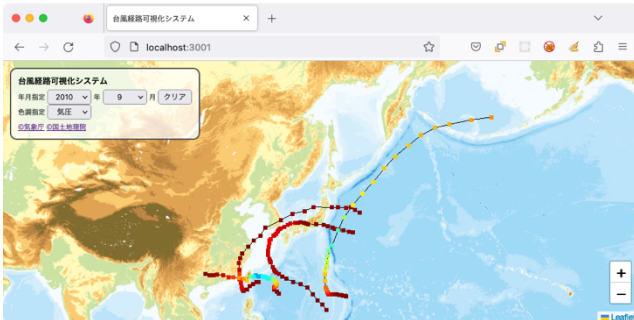
項目名	説明
年	UTC
月	UTC
日	UTC
時	UTC
台風番号	西暦の下 2 桁+その年の発生番号
台風名	アジア名
階級	2 最大風速 17m/s 未満 3 最大風速 17m/s 以上, 25m/s 未満 4 最大風速 25m/s 以上, 33m/s 未満 5 最大風速 33m/s 以上 (2-5: 熱帯低気圧, 3-5: 台風) 6 温帯低気圧 7 中心が北西太平洋 (赤道より北, 東経 180 度より西) の外にあり, 6 時間以内に中心が北西太平洋の中に入る熱帯低気圧
緯度	度
経度	度
中心気圧	hPa



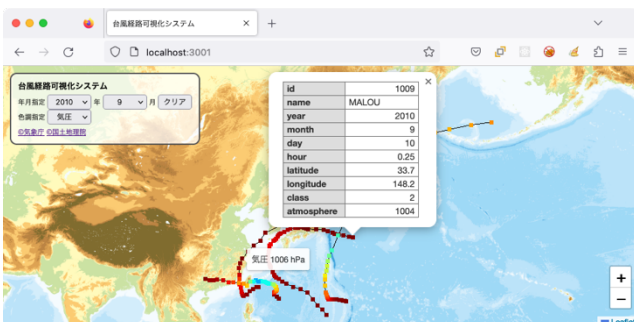
第 1 図 アプリケーションの初期表示



第 2 図 2010 年 9 月発生した台風を抽出表示した例



第 3 図 2010 年 9 月発生した台風を中心気圧のグラデーションで着色、表示した例



第 4 図 点の情報をポップアップ、ツールチップで表示した例

点の色は台風の階級別での着色に加えて、台風の当該位置における中心気圧に対応したグラデーションで着色することも可能である。図 3 に 2010 年 9 月に発生した台風的位置と経路を中心気圧のグラデーションで着色、展開した例を示す。

これらの他にアプリケーションは点のマウスオーバーで表示中の色調での値を表示する機能、点をクリックしてその点が保持する情報を表示する機能を装備している (図 4)。

3. 作成データ

本件ではアプリケーションで使用するデータとして 3 種類のファイルを生成した。

- CSV 形式ファイル (22 ファイル)
元の CSV 形式ファイルからアプリケーションの表示で使用する項目のみを抽出してファイルを生成した。点をクリックした際のポップアップ表示で使用している。
- 点群 PNG 形式ファイル (22 ファイル)
作成した CSV 形式ファイルから西岡 (2023) の仕様に従って点群 PNG 形式ファイルを生成した。点群の描画にはこのファイルを使用している。
- 色調決定ファイル (階級用と中心気圧用)
点の着色規則を定めた PNG ファイルを生成した。

4. 改良点

4.1 点群データの事前加工

点群 PNG 形式ファイルでデータを受け取る場合、基本的に各ピクセルの色 (RGB) を元の値に復元する演算が必要である。その数式の一例を以下に示す。

$$v = (r \times 65536 + g \times 256 + b + et) \times 10^{-f} \quad (\text{復元式 1})$$

r : R 値, g : G 値, b : B 値, et : オフセット, f : 係数常用対数

従来はこの演算を描画の都度実行していたが、WebGL の最新バージョン (WebGL 2.0) で実装された Transform feedback により、起動時に 1 度だけ演算を実行して以降は

その結果を再利用することで処理負荷を軽減することが可能であると推察し、実装した。

位置座標の場合、復元した値をさらに画面上の位置座標に変換 (アフィン変換) する演算が必要になるが、この演算は地図の縮尺変更や地図移動により与えるパラメータが変わるため、描画の都度実行する。

4.2 GPU の特性に合わせたプログラムの最適化

CPU は万能な演算装置であるが GPU は元来出力に特化した演算装置であり演算の種類によって得手不得手がある。例えば if 節による条件分岐は不得手でその処理負荷が高く、処理する点の数が増えると動作の遅延を体感できるほどである。条件分岐が必要な処理は三項演算子や GLSL 組み込み関数である step 関数 (値が閾値未満で 0, 閾値以上で 1 を返す) 等で書き換えて処理負荷軽減を図る。

また GPU は行列による演算を得意としており、前述のアフィン変換は行列を用いて演算することで負荷を軽減できる。復元式 1 における赤字で示した部分は GLSL 組み込み関数である dot 関数を用い、 (r, g, b) と $(65536, 256, 1)$ の内積として演算することで処理負荷を軽減できる。

4.3 パラメータの事前加工

パラメータを GPU に転送して加工すると、その演算が全ての点に対して実行されるため非効率である。例えば復元式 1 における青文字で示した部分がそれに該当する。

加工が必要なパラメータについては GPU に転送する前に JavaScript (CPU) で演算しておき、その結果を転送して使用することで処理負荷を軽減できると推察する。

4.4 点の識別処理の見直し

WebGL の以前のバージョンで点を識別するには、位置や各種値に加えて点を識別するための値を GPU に転送する必要があった。そのため GPU に転送するデータ量が増え、GPU メモリ空間の逼迫を招く可能性があった。

WebGL 2.0 では点データの並び順を格納した暗黙の変数 `gl_VertexID` が利用可能となった。このため別途点識別のための値を転送しなくても点を識別することが可能になり、GPU メモリの使用量抑制を実現することができた。

5. おわりに

本件では、最新技術を利用した二次元ウェブ地図上での点群展開処理手法の改良について紹介したが、無償で利用可能な十分大量の点群データを得ることが出来ず、2 万点弱の少ない点群で検証することしか出来なかった。著者は本件の成果により、相応の GPU を搭載したコンピュータであれば 1 億点程度の点群を高速展開することが可能であろうと予測している。今後は十分大量で、値から色調を決定する機能を必要とする点群データを用いて本件の改良が効果的であることの検証をおこないたいと考えている。

文 献

- 気象庁 (2023) 気象庁 | 台風位置表. https://www.data.jma.go.jp/yoho/typhoon/position_table/index.html
- 北尾馨 (2020) WebGL を用いた点群を展開するウェブ地図アプリケーションの試作. 情報地質, vol.31, no.3, pp.79-85.
- 北尾馨・西岡芳晴 (2022) 点群 PNG を用いたウェブ地図上での点群展開とポリライン群の描画. 第 33 回日本情報地質学会講演会, 講演要旨集, pp.47-48.
- 西岡芳晴 (2023) 点群 PNG. https://gsj-seamless.jp/labs/p_cpng/
(ウェブサイトの確認日: 2023 年 5 月 17 日)

地層対比システムにおけるボーリングデータの可視化

櫻井 健一*・米澤 剛*・根本 達也**・升本 眞二***

Visualization of Borehole Data for Correlation System of Strata

Kenichi SAKURAI* , Go YONEZAWA* , Tatsuya NEMOTO** and Shinji MASUMOTO ***

- * 大阪公立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan. E-mail:sakurai@cit.sangitan.ac.jp
- ** 大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.
- *** 大阪市立大学名誉教授 Professor Emeritus of Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.

キーワード：ボーリングデータ, 3次元可視化, Web-GIS, Web API, 地層対比

Key words : Borehole data , 3D visualization , Web-GIS , Web API , Correlation of strata

1. はじめに

都市部において地下構造を把握するには、ボーリング調査を行い、そのデータを解析することが一般的である。

ボーリング調査によって得られたボーリング柱状図や土質試験の結果の多くは、「国土地盤情報検索サイト」(KuniJiban)やジオ・ステーション(Geo-Station)などを通じて一般に公開されている。

昨年、本学会にて発表した「WebGLを用いたボーリングデータ 3次元可視化システムの開発」(櫻井ほか, 2022)では、「地質・土質調査成果電子納品要領(案)」で定められたボーリング交換用データ(XML)形式で公開されている地盤情報をサーバーに取り込むだけで、Webブラウザ上にボーリング情報を3D表示できるシステムの開発について扱った。

本発表では、そのシステムにボーリング柱状図を表示できる機能を新たに追加した。この機能に地層対比機能を加えるなら、升本ほか(2009)のOCUジオモデラーにおける地層対比システムとして活用でき、入力データと標高データの作成が行えるようになる。これにより、広く一般に公開されているボーリング交換用データを用いて地層境界面の形状推定を行えるようになる。

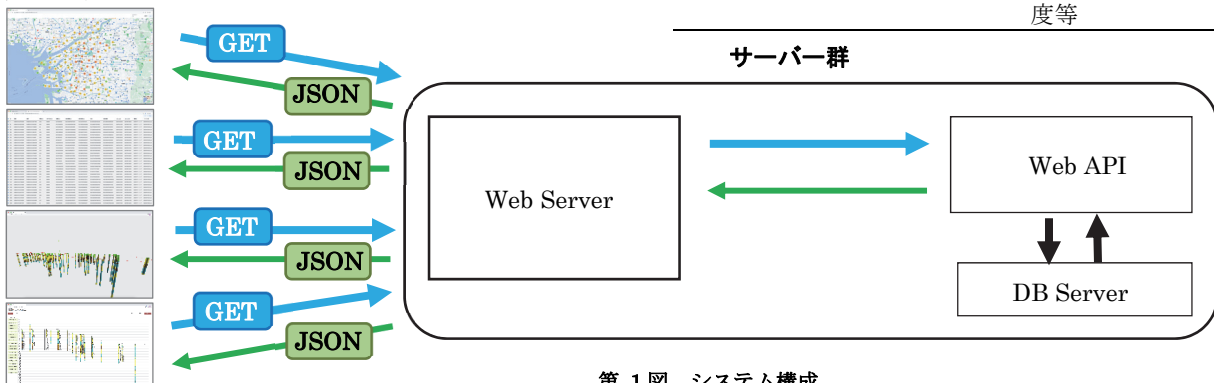
2. システムの構成

システムの全体構成図を第1図に示す。データベースに保存されているデータの参照や更新を行うための既存のWeb API サービスに、ボーリング柱状図を表示するための機能を新たに追加した。

本Web API サービスにHTTPリクエストを送信すると、処理結果をHTTPレスポンスで受信できる。受信するデータはJSON形式にフォーマットされている。本システムで動作するWeb API サービス内容と主な出力データを第1表に示す。Web APIを使用することでデータベースに保存されているボーリング情報をWeb-GIS上に表示できる。さらにWeb-GIS状で範囲を指定し、ボーリング情報を3D表示および、ボーリング柱状図を表示することが出来るようになる。

第1表 APIのサービス一覧

サービス内容	主な受信データ項目
1 Web-GIS 表示データの取得	全ボーリングデータの緯度・経度、ボーリングデータのID等
2 3D表示したい地点のボーリング情報データの取得	指定された範囲内のボーリングIDと緯度経度、ボーリング名等
3 表示したいボーリング情報データの取得	選択されたボーリングデータの緯度・経度、ボーリングデータのID等
4 表示したいボーリングコア情報の取得	選択されたボーリングID、ボーリングコアの土質情報等
5 表示したいボーリングN値データの取得	選択されたボーリングデータのN値とN値の深度等



第1図 システム構成

3. システムの流れ

3.1 ボーリング表示位置選択

Web-GIS を用いてデータベースに保存されているボーリングの位置を表示する。

3D 表示および、ボーリング柱状図を表示したいボーリングの開始地点と終了地点をクリックすることにより、あらかじめ指定した幅の長方形が表示されその範囲内のボーリングデータをすべて選択することができる。選択したボーリングはオレンジ色で表示される(第 2 図)。

3.2 表示ボーリング選択

Web-GIS 上で選択したボーリング情報は決定ボタンをクリックすることにより一覧表示できる(第 3 図)。この表示はデータベースの項目別にソートすることができる。また、3D 表示および、ボーリング柱状図に用いたいボーリングデータをチェックボックスにて選択する。

3.3 3D ボーリング表示

3.2 で選択したボーリングデータは「3D ボーリング表示」ボタンをクリックすることにより第 4 図のように 3D 表示される。3D 表示はマウス操作により拡大、縮小、視点変更ができる。また、各ボーリングは土質データごとにイメージ図で表示分けされている。

3.4 ボーリング柱状図表示

3.2 で選択したボーリングデータは「ボーリング柱状図表示」ボタンをクリックすることにより第 5 図のようにボーリング柱状図として表示される。ボーリング柱状図は N 値が含まれている場合には N 値も柱状図右側に表示される。それぞれの土質データにマウスをマウスオーバーすることにより、土質名や上下部深度など詳細データを表示することができる。

4. おわりに

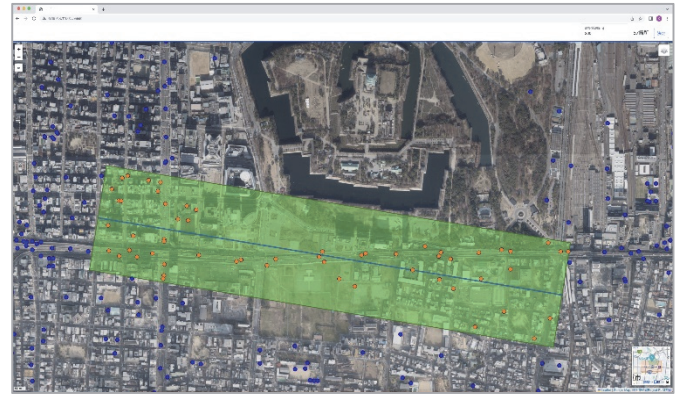
本システムには以下の特徴がある。

1. 「地質・土質調査成果電子納品要領(案)」で定められたボーリング交換用データの形式で公開されているボーリング情報をデータベースに保存し簡単に Web ブラウザ上で 3D 表示もしくは、ボーリング柱状図として表示できるようになる。
2. システムの構築はすべて OSS(Open Source Software)を用いているためサーバー構築の知識さえあれば、オンプレミスサーバーやクラウドサーバー上に費用をかけず構築できる。
3. Web API を用いて HTTP レスポンスにてデータのやり取りを行うため開発言語や動作 OS に因らず活用しやすい。
4. Web API を用いている為、既存のシステムに組み込みやすい。

今後、OCU ジオモデラー(升本ほか、2009)において Terramod-BS を用いた地層境界面推定に利用する入力用データ作成が行えるよう地層対比システムにおける対比機能を追加する。追加後、実データを用いて地層境界面の推定を行い、実用化にむけてさらなる検討を重ねていきたい。

文献

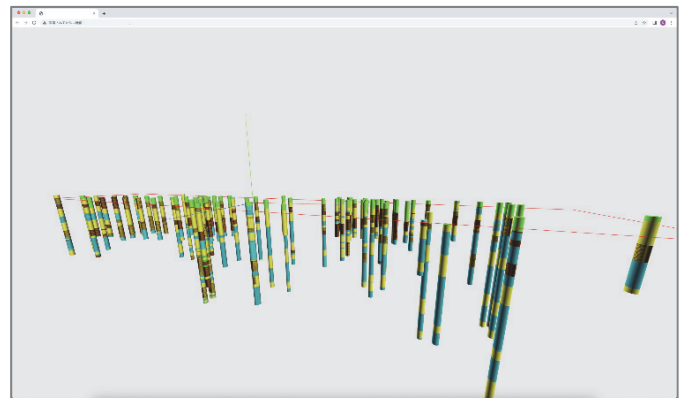
櫻井健一・米澤剛・根本達也・升本真二(2022) WebGL を用いたボーリングデータ 3 次元可視化システムの開発. 情報地質, 講演要旨集, pp.39-40.
 升本真二・野々垣進・サラウット ニンサワット・岩村里美・櫻井健一・生賀大之・ベンカテッシュ ラガワン・塩野清治(2009) Web-GIS を用いた 3 次元地質モデル構築システム. 情報地質, vol.20, no.2, pp.94-95.



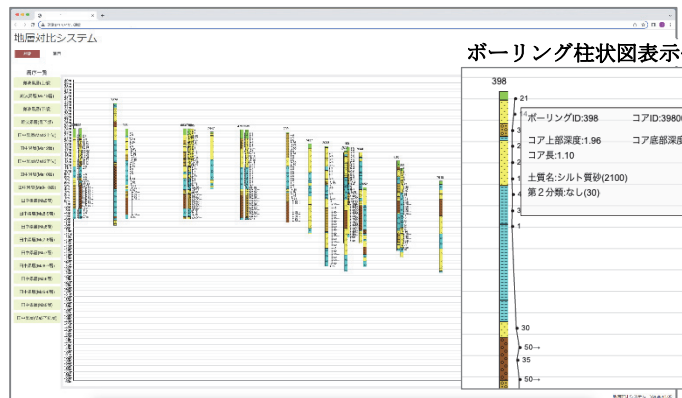
第 2 図 ボーリング選択画面(ボーリングデータ選択中)



第 3 図 表示ボーリング選択画面



第 4 図 3D ボーリング表示画面



第 5 図 ボーリング柱状図表示画面

ボーリング柱状図表示例(拡大)

WebGL を用いた都市地質地盤情報のボクセルモデルビューア

野々垣 進*・中澤 努*

Voxel model viewer for geological information in urban area using WebGL

Susumu NONOGAKI* and Tsutomu NAKAZAWA*

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567 JAPAN.
E-mail: s-nonogaki@aist.go.jp

キーワード：ボクセルモデル, WebGL, 可視化, 地質情報, 都市

Key words: Voxel model, WebGL, Visualization, Geological Information, Urban area

1. はじめに

産業技術総合研究所地質調査総合センター（以下、GSJ）では、経済産業省による知的基盤整備の一環として、“都市域の地質地盤図”の作成に取り組んでいる。この取り組みは、GSJ が作成した層序学・堆積学的に詳細な情報をもつボーリングデータを軸として、土木・建築工事で作成された大量のボーリングデータに対して地層の対比を行い、その結果を基に 3 次元地質モデルを作成することで、都市平野部の地下数十メートルにおける地質構造を明らかにするものである。これまでに千葉県北部地域（納谷ほか、2018）および東京都区部（納谷ほか、2021）の地質地盤図が作成され、GSJ のウェブサイト「都市域の地質地盤図」（URL：<https://gbank.gsj.jp/urbangeol/>）から公開されている。

上記ウェブサイトでは、複数の地層基底面を重ねた合わせた地質サーフェスモデルと、岩相や N 値を表すテキスト画像付きボーリングデータとを合成した地質立体図を表示できる（野々垣・中澤、2022）。この地質立体図には、誰もが容易に地層の広がりを確認できるという利点がある一方、各地層内の物性の広がりについては、点在するボーリングデータのテキスト画像から判断するしかないという難点もある。我々はこの問題を解決するために、今後地質サーフェスモデルと並行して、岩相や N 値の分布を示すボクセルモデルを整備することを検討している。本発表では、この整備事業の一環として開発中のボクセルモデルビューアについて紹介する。

2. システム構成

本ビューアは、ウェブブラウザに標準装備される WebGL を利用してボクセルモデルを可視化するウェブアプリケーションである。開発言語には JavaScript を、WebGL プログラミングには 3DCG ライブラリのひとつである three.js を用いている。ビューア本体はアイコン等の画像、スタイルシート、および後述の各機能を実現する JavaScript コード群から構成され、モデルデータを納めるディレクトリ（データディレクトリ）とは別階層のディレクトリで管理される。データディレクトリは、ボクセルモデルとその凡例ファイ

ル、およびビューアを呼び出すための HTML ファイルから構成される。ボクセルモデルと凡例は、データの種類ごとに準備する必要がある。

本ビューアの利用に必要なソフトウェア環境はウェブブラウザのみである。Mozilla Firefox, Microsoft Edge, Google Chrome, Safari など主要なウェブブラウザを利用でき、ブラウザからデータディレクトリ内の HTML ファイルにアクセスすることで、ボクセルモデルを可視化できる。

3. 機能の概要

第 1 図にビューアの操作画面の例を示す。操作画面は、左上の表示設定ボタン、左下の凡例、およびそれら以外のモデル表示部から構成される。モデル表示部の端には、視点に関するスライダーが設けられており、各スライダーを動かすことでモデルの回転や拡大・縮小を行える。表示に関するより高度な操作は表示設定ボタンから行う。以下に表示設定ボタンから利用できる主な機能を記す。

1) 高さ倍率の調整機能

ボクセルモデルの水平方向と鉛直方向の比率（高さ倍率）を調整する機能である（第 2 図(a)）。上下方向のスライダー方式で、整数単位で高さ倍率を調整できる。

2) 属性の選択表示機能

ボクセルモデルがもつ属性ごとに表示・非表示を切り替える機能である（第 2 図(b)）。トグルボタン方式で、特定の属性をもつセルだけを絞り込んで表示できる。

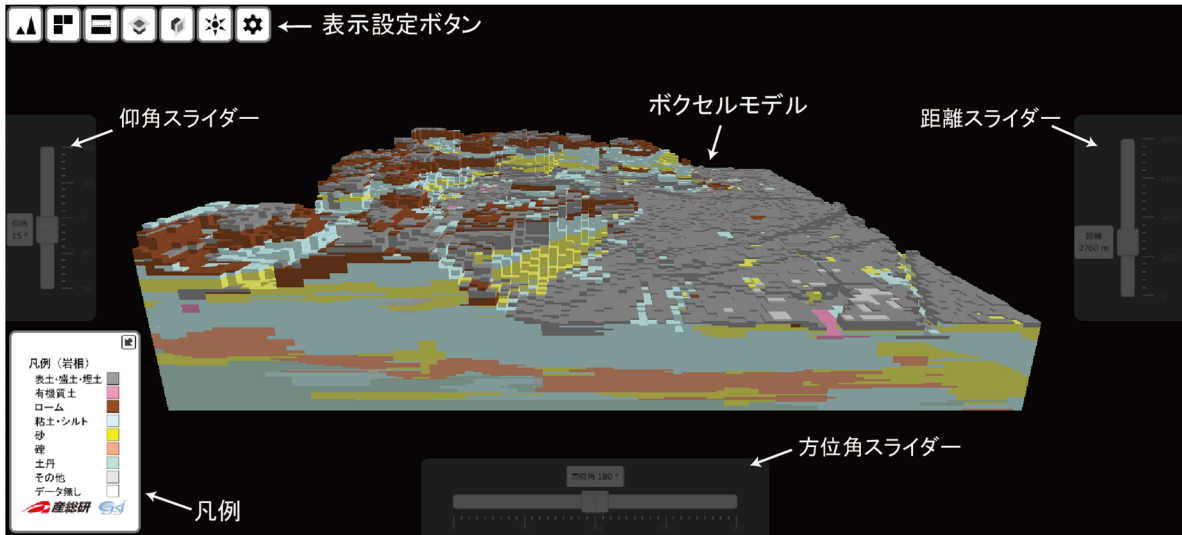
3) 水平断面の表示機能

任意の標高におけるモデル全域の水平断面を表示する機能である（第 2 図(c)）。上下方向のスライダー方式で、断面を表示する標高を調整できる。

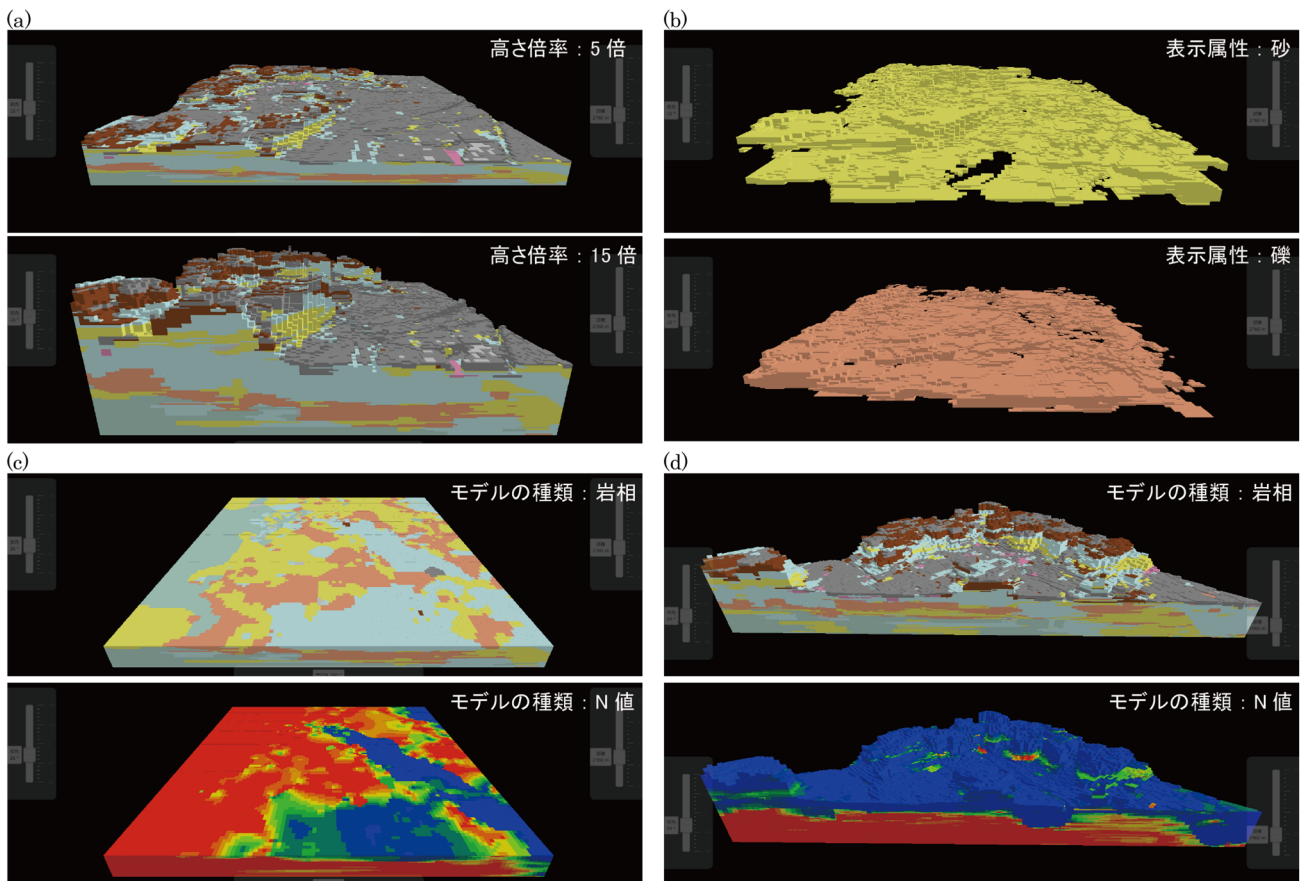
4) 鉛直断面の表示機能

任意の測線に沿った鉛直断面を表示する機能である（第 2 図(d)）。円形スライダーで断面の方位を、左右方向のスライダーでモデルの中心点から断面までの距離を設定することで測線位置を調整できる。

ビューアには上記のほか、モデルの種類の切り替えや操作画面の背景色の変更、モデルを照らす光源の調整などを行う機能が実装されている。



第1図 ボクセルモデルビューアの操作画面.



第2図 ビューアの機能. (a)高さ倍率の調整, (b)属性の選択表示, (c)水平断面の表示, (d)鉛直断面の表示

4. おわりに

都市地下浅部における物性の広がり示すボクセルモデルを、ウェブブラウザ上で可視化するビューアを開発した。本ビューアを用いれば、単純なマウス操作によりボクセルモデルを様々なスタイルで表示できるため、地質サーフェスモデルビューア(野々垣・中澤, 2022)と併用することで、従来よりもわかりやすく都市地下浅部の地質地盤情報を提示できるようになると考える。現状のビューアはボクセルモデル以外の情報を表示する機能を有していない。今後、地図をはじめとする地理空間情報を重畳できるように改良を加える予定である。

文 献

- 納谷友規・野々垣 進・小松原純子・宮地良典・中澤 努・風岡修・塩崎翔一・香川 淳・吉田 剛・加藤晶子・八武崎寿史・荻津 達・中里裕臣 (2018) 都市域の地質地盤図「千葉県北部地域」(説明書). 産総研地質調査総合センター, 55p.
- 納谷友規・小松原純子・野々垣 進・尾崎正紀・宮地良典・中澤 努・中里裕臣・鈴木毅彦・中山俊雄 (2021) 都市域の地質地盤図「東京都区部」(説明書). 産総研地質調査総合センター, 82p.
- 野々垣 進・中澤 努 (2022) WebGLを用いた都市地下浅部の地質サーフェスモデルビューア, 情報地質, pp.41-42.

帯水層の三次元形状可視化プログラムの開発と水理構造解析への応用

山本 駿¹・小池 克明²・柏谷 公希²・山敷 庸亮¹

Program Development of Three-dimensional Visualization of Aquifer Shape with Application to Hydraulic Structure Analysis

Shun Yamamoto¹, Katsuaki Koike², Koki Kashiwaya² and Yosuke Alexandre Yamashiki¹

- 1) 京都大学大学院総合生存学館 Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability Kyoto University, Yoshidanakaadachicho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8306, Japan.
E-mail: yamamoto.shun.58r@st.kyoto-u.ac.jp
- 2) 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.

キーワード：3次元地質モデリング, 可視化, 地質境界面, 地質分布

Key Words : three-dimensional geological model, visualization, geologic boundary plane, geologic distribution

1. はじめに

地質学的な調査や解析において、地下構造の三次元的な理解は不可欠である。特に帯水層の形状や分布は、地下水の流れや地下資源の評価に直結する重要な情報である。一般には、地質構造を理解するために、地質断面図を用いるが、断面図は二次元的な情報しか提供しないため、地下構造の三次元的な理解には限界がある。この問題を解決するため、本研究では Python を用いて、VTK (Visualization Toolkit) による地質断面図の三次元可視化プログラムを開発した。このプログラムを用いて、断面図から地下構造の三次元可視化を行うことで、地下構造の三次元的な理解を深めることが可能となる。活用例として京都盆地と熊本平野の地質構造の三次元可視化を行った。

2. 対象地域

京都盆地の深部の大阪層群では、火山灰の地層や海進期に堆積した海成粘土層が複数確認されている。大阪層群の海成粘土層は、難透水層として地下水流動を規制する可能性が高く、その構造のモデル化は地下水流動の理解において重要である。そこで、複雑な地下深部の構造を解析するために、「京都盆地の地下構造に関する調査」(京都市, 2003) や「大阪平野の地下構造調査」(大阪府, 2003), 「平成 17 年度京都府地震被害想定基礎調査」(京都府, 2006), 「奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測」(京都大学防災研究所, 2020) などによる複数の反射法地震探査の測線から得られた断面図を用いて三次元可視化を行った。

熊本平野では、2016 年の熊本地震の影響は地下水に及んでおり (Hosono *et al.*, 2020), この地域の帯水層と断層の関係性の理解は重要である。本研究では、Koike and Matsuda (2005) による地質モデリングの解析結果の断面図を組み合わせることで三次元化を行った。

3. データの解析手法

断面図の三次元可視化においては、Python を用いて断面図の読み取りと VTK ファイルへの変換を行うプログラムを開発し、作成した VTK ファイルを ParaView で視覚化した。

Python は、強力で柔軟な機能を持つプログラミング言語であり、科学技術計算やデータ解析に広く用いられている。Python はオープンソースであるため、世界中の開発者がその改善に貢献しており、その結果、豊富なライブラリとコミュニティが形成されている。

また、VTK は、科学技術計算の結果を三次元で可視化するためのオープンソースのソフトウェアであり、3D コンピュータグラフィックス、画像処理などを行うためのライブラリを提供しており、Python などの他の言語からも利用することが可能である。

ParaView は、データ解析と視覚化のためのオープンソースのアプリケーションであり、大規模なデータセットを効率的に視覚化し、ユーザーがデータをインタラクティブに探索できるように設計されている。

これらのオープンソースのツールは、地質学的な調査や解析においても重要なツールとなり、その改善と発展は、調査や解析の効率化と高精度化に大きく寄与する可能性がある。

本研究では、まず各断面図の測線の位置図の画像を地図上にオーバーレイさせて測線の緯度経度をプロットして読み取り、座標変換を行って、XY 座標を得た。次に、断面図の画像のピクセル数や図表中の縮尺、XY 座標から計算された測線長などを用いて、画像のピクセル数と実際の長さの縮尺を計算することで、適切な Z 座標を設定した。この XYZ 座標を元に断面図の画像ファイルを VTK ファイルに変換を行った。

また、国土地理院の数値標高モデル (Digital Elevation

Model)についても、同様に VTK ファイルへの変換を行うことで、各断面図と共に可視化を行い、数値標高モデルによる地表面の位置を参照して、断面図の XYZ 座標の再調整を行った。

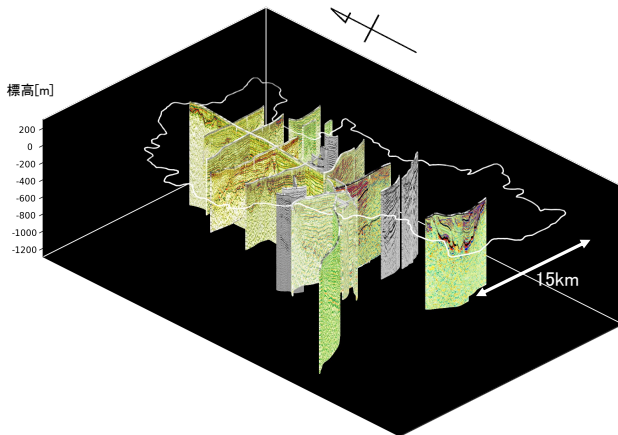
変換においては、視覚的に分かりやすくなるようにすべての VTK ファイルで Z 軸方向の長さを 20 倍にした。

4. 解析結果と考察

京都盆地と熊本平野の地質構造の三次元可視化を行った結果、それぞれの地域の地下構造の特徴とその空間分布を詳細に把握することができた。

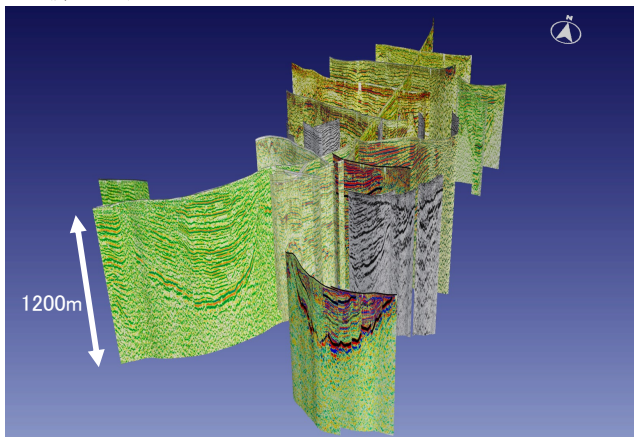
また、VTK ファイル作成時に得られた断面図の XYZ 座標を用いて、Python における標準的な可視化ライブラリである Matplotlib で表示したところ (第 1 図)、特定の角度の視点からの一枚の画像の描画に 10 分以上の時間が必要であった。ParaView を用いれば、任意の視点への変更は容易であり、本研究で用いた手法の優位性が示された。

これは、Matplotlib が二次元の画像の描画を基本としているため、三次元の画像の描画に向いていないことが原因であると考えられる。



第 1 図 京都盆地で実施された反射法地震探査の Matplotlib による可視化

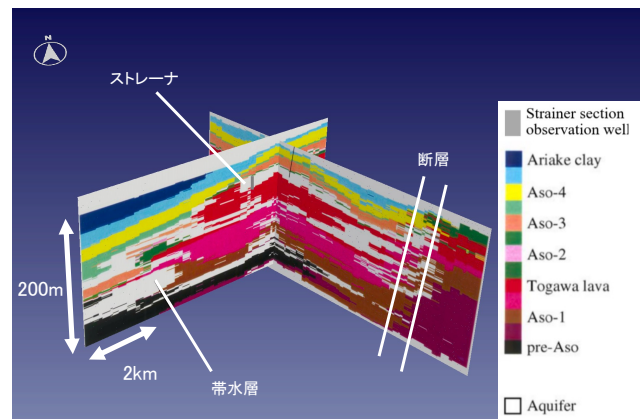
京都盆地では、反射法地震探査断面における海成粘土層の位置を抽出し、三次元的な分布を追跡した。この結果に普通クリギング(OK)を適用することで、三次元分布を推定した (第 2 図)。



第 2 図 京都盆地で実施された反射法地震探査の ParaView による可視化

推定の結果、文献によって海成粘土層の位置の解釈に齟齬が生じている部分があることを明らかにできた。盆地全体での三次元分布が明瞭となり、高精度な京都盆地の三次元地質構造モデリングに繋がった。

熊本平野では、活断層である布田川断層と帯水層の繋がりを、および帯水層と地下水観測井戸のストレーナの位置関係を二次元断面図で表すよりもより直感的に表現することができた (第 3 図)。図は 3 次元最適化原理とモンテカルロシミュレーションによって作成した有明粘土層、阿蘇火砕流堆積物、砥川溶岩、先阿蘇火山岩類などの分布であり、電気検層データと組み合わせて帯水層である可能性が高い部分を白色で表している。図から最浅部の帯水層にストレーナが位置していること、およびこの帯水層が布田川断層と繋がっていることなどが明らかである。



第 3 図 熊本平野の帯水層の ParaView による可視化 (地下構造モデルは Koike and Matsuda (2005) による。灰色線が井戸のストレーナ、白色部が推定帯水層、断層は布田川断層を表す)

5. まとめ

本研究では、Python 用いて地質断面図を VTK ファイルに変換するプログラムを開発し、ParaView によって、京都盆地と熊本平野の地質構造の三次元可視化を行った。

本研究で作成したプログラムおよび利用したプログラムは、地質学的な調査や解析に広く利用することが可能である。また、可視化によって得られる地下構造の詳細な理解は、地下水の流れや地下資源の評価に重要な情報を提供する。

このようなオープンソースのプログラムの開発と活用は、地質学的な調査や解析の効率化と普及に大きく寄与すると考えられる。

文献

- Hosono, T., Yamada, C., Manga, M., Wang, C.-Y. and Tanimizu, M. (2020) Stable isotopes show that earthquakes enhance permeability and release water from mountains. *Nature Communications* 11, 2776.
- Koike, K. and Matsuda, S. (2005) Spatial modeling of discontinuous geologic attributes with geotechnical applications. *Engineering Geology* 78, 143–161.
- 京都市 (2003) 京都盆地の地下構造に関する調査成果報告書.
- 京都府 (2006) 平成 17 年度京都府地震被害想定基礎調査業務報告書.
- 京都大学防災研究所 (2020) 奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測 令和元年度成果報告書.
- 大阪府 (2003) 大阪平野の地下構造調査成果報告書.

種々の地殻情報の GIS 利用による日本周辺海底熱水鉱床の形成支配要因の検出

橋本 裕介*・久保 大樹*・小池 克明*

Detection of control factors on generation of seafloor hydrothermal deposits around Japan through GIS application of multiple crustal information.

Yusuke Hashimoto*, Taiki Kubo* and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan. E-mail: hashimoto.yusuke.38z@st.kyoto-u.ac.jp (Hashimoto)

キーワード：海底熱水鉱床，鉱床分布，Arc GIS，クリギング

Key Words : Seafloor hydrothermal deposit, Deposit distribution, ArcGIS, Kriging

1. はじめに

近年、陸上の鉱物資源は経済性の高い優良鉱床の発見が困難となってきている。さらに我が国は金属鉱物資源のほぼ全てを海外からの輸入に依存していることから、我が国周辺海域に賦存する海底鉱物資源への関心や期待が高まっている。開発が可能となれば、我が国にとって海底は、他国の資源政策等に左右されることのない資源の安定供給源となる可能性が高い。

海底鉱物資源の中でも海底熱水鉱床は、貴金属(金、銀)、銅、鉛、亜鉛など多種の金属を含み、高品位で価値の高い鉱床である。さらに、他の資源に比して水深が浅いので比較的開発が容易で我が国の排他的経済水域(EEZ)内に数多く発見されている(例えば棚橋ほか, 2006)。しかし、海底熱水鉱床の分布状況が十分に明らかになっておらず、資源量が不明確となっている。そこで本研究は、この海底熱水鉱床がどこにどのような場で形成され、その法則性から未発見の鉱床がどこに存在するのかを解明することを目的として、熱水鉱床の分布と種々の地殻情報との関連性を検討した。この地殻情報として、地殻熱流束、重力異常、海底地形、および震源データを選び、GIS(地理情報システム)ソフトウェアである ArcGIS(Esri 社)を用いて解析した。

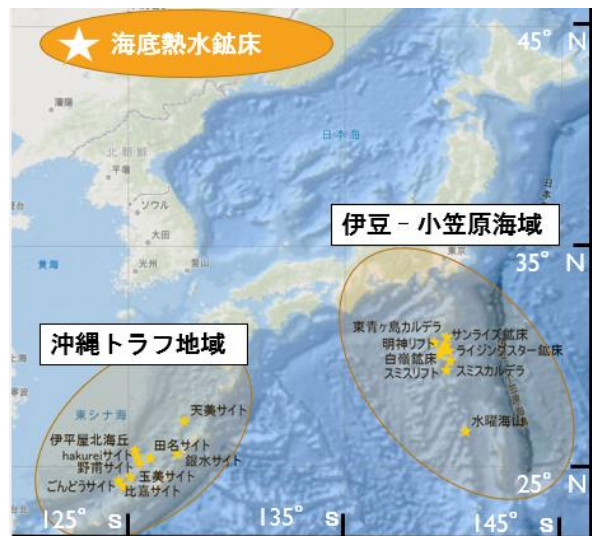
2. 解析対象データ

本研究では、解析に海底熱水鉱床の位置情報、海底地形データ、地殻熱流束、重力異常(ブーゲー異常)、震源分布のデータを使用した。NOAA(アメリカ海洋大気庁)とIPGP(パリ地球物理研究所)が提供している海底熱水噴出孔の座標データから日本近海に存在するものを選び、実際に海底熱水鉱床が形成されているかの文献調査を行った。その結果、日本近海の 18 箇所の海底熱水鉱床を選出し、それらの位置を特定した(第1図)。海底地形として、海底の標高のグリッドデータである NOAA の DEM(数値標高モデル)を利用した。地殻熱流束のデータは、地質総合調査センターの「日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流束データベース」を、重力異常データは産業総合研究所による「日本重力データベース」を利用した。さらに震源データには USGS(アメ

リカ地質調査所)の Search Earthquake Catalog を利用し、これからマグニチュード 4.5 以上の地震の震源データを過去 40 年分入手した。

3. データの解析手法

本研究では、海底熱水鉱床分布の法則性抽出に有効と考えられる 4 つの地殻情報(海底地形、地殻熱流束、重力異常、震源分布)を選び、これらと鉱床の位置の関連性について検討した。そのためにまず、発見されている日本近海海底熱水鉱床や熱水噴出孔の位置を ArcGIS で地図(WGS 1984)上にプロットした。次に、地殻構造との関連の一つとして、標高や地形補正が行われた重力異常のグリッドデータを用いて、熱水鉱床付近のブーゲー異常の断面図、凹凸を強調した陰影図、および曲率図を作成し、鉱床周辺での重力異常の変化に注目した。また、DEM をもとに熱水鉱床付近の海底地形の特徴を、重力異常データと同様の手法で解析した。



第1図 本研究の解析の対象とした海底熱水鉱床の分布。鉱床は主に沖縄トラフ地域と伊豆 - 小笠原海域に存在している。

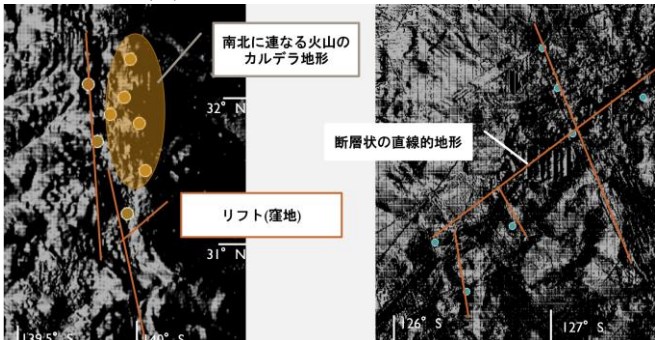
次に、3076点で測定された日本周辺の地殻熱流束データを用い、空間内挿法の一つであるクリギングによって、EEZ内と海底熱水鉱床周辺の熱流束分布を推定し、鉱床周辺の地殻熱流束の変化を明らかにした。ここではセミバリオグラムのパラメータ推定の不確実性を考慮するために、経験ベイズ・クリギング(Krivoruchko and Gribov, 2019 など)を用いた。さらに、これらの情報と前述の震源の位置、マグニチュードとを重ね合わせた。

4. 解析結果

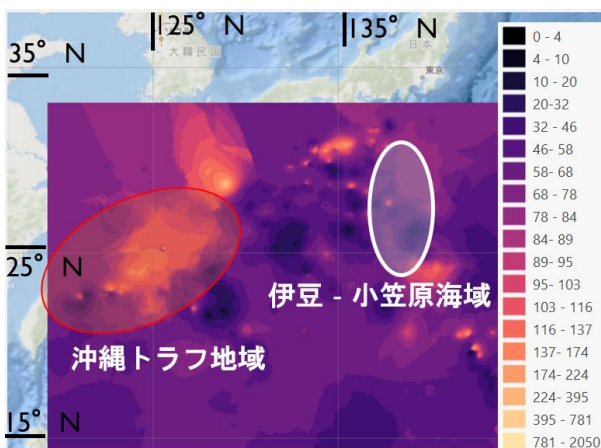
ArcGIS で地図(WGS 1984)上に海底熱水鉱床を表示したところ、鉱床は伊豆 - 小笠原海域と沖縄トラフ地域の 2 つの範囲に分布することが確認できた(第 1 図)。また DEM から陰影図を作成し、海底熱水鉱床の周辺の海底地形に注目したところ、鉱床は火山のカルデラ地形上、火山帯の近くに存在する窪地のリフト、および断層のような直線状地形に分布していることが明確になった。その例を第 2 図に示す。

経験ベイズ・クリギングによる地殻熱流束の分布から各海底熱水鉱床の位置での熱流束の推定値を求め、ヒストグラムや累積度数分布図を作成したところ、海底熱水鉱床は上位 8 パーセント以内に入る、特に大きな熱流束域にあり(第 3 図)、現在でも高温熱水の上昇が活発であることが確かめられた。

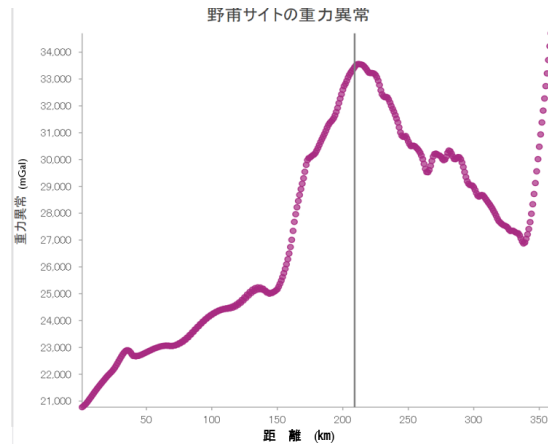
震源分布について、地震の規模を表すマグニチュードとの関連性は見られなかったが、海底熱水鉱床の位置に沿って深さ 90~150 km の範囲に、震源が集中することが明らかになった(第 3 図)。さらに、海底熱水鉱床を通る測線でのブーゲー異常の断面図を作成すると、鉱床は局所的重力異常の高まりに位置していることがわかった(第 4 図)。



第 2 図 伊豆 - 小笠原海域(左)と沖縄トラフ地域(右)の海底熱水鉱床周辺の DEM 陰影図。点は海底熱水鉱床の位置を表す。



第 3 図 海底熱水鉱床周辺の地殻熱流束の推定分布図(mW/m²)。



第 4 図 沖縄トラフ地域の野甫サイトを通る測線上でのブーゲー異常断面図。縦線は野甫サイトの位置を表す。

5. 考察

前述のように、海底熱水鉱床はカルデラ、リフト、および断層状の地形に分布していることがわかった。これらの地形の深部にはマグマが貫入しており、これが大きな熱源となって熱水活動が行われていると考えられる。

伊豆 - 小笠原海域は火山帯に位置し、マグマ貫入などによって隆起状の地形であり、低密度の流紋岩質軽石などの分布(湯浅, 1995)によって重力異常が小さくなっている。逆に沖縄トラフは背弧海盆に位置し、沈降状の地形であり、重力異常が大きく、海底熱水鉱床は局所的重力異常の高まりに位置することがわかった。よって、海底熱水鉱床の深部に、高密度の玄武岩質マグマが貫入していると推測できる。これらのマグマ貫入は、沖縄トラフと伊豆 - 小笠原海域のいずれでも海底熱水鉱床付近の熱流束が特に高いことから示唆される。本研究は海底熱水鉱床下の深度 90~150 km に比較的マグニチュードの大きな震源の集中分布を見出したが、これはスラブの脱水作用によるマグマ発生と上昇を示唆し、これが鉱床生成のソースである玄武岩質マグマの貫入になると考えられる。

6. まとめ

日本の EEZ に存在する 18 箇所の海底熱水鉱床を対象とし、鉱床分布の法則性抽出に有効と考えられる 4 つの地殻情報(海底地形、地殻熱流束、重力異常、震源分布)と鉱床位置の関連性について検討した。その結果、深度 90~150 km で比較的マグニチュードの大きな地震が集中するゾーン上に鉱床が位置するなどの特徴を明らかにできた。

謝辞：本研究にあたって種々の海底データ情報をご教示いただいた JAMSTEC の木戸ゆかり氏と兵庫県立大学の後藤忠徳教授に深甚の謝意を表したい。

文献

- Krivoruchko, K. and Gribov, A. (2019) Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics*, v. 32, 100368.
- 棚橋道郎・塩川 智・村山信行・高取亮一 (2006) 伊豆・小笠原弧背弧リフト帯ベヨネーズ海丘で発見された大規模海底熱水鉱床。資源地質, vol. 56(2), pp. 185-196.
- 湯浅真人(1995)「しんかい 2000」による海底火山軽石の観察:明神海丘調査。火山, vol. 40(4), pp. 277-284.

能登半島北東部の群発地震

石川有三

Earthquake swarm in Noto peninsular

Yuzo Ishikawa

静岡大学防災総合センター
Shizuoka university, E-mail:catfish@wa2.so-net.ne.jp

キーワード：能登半島北東部、群発地震
Key words：Noto peninsula, earthquake swarm

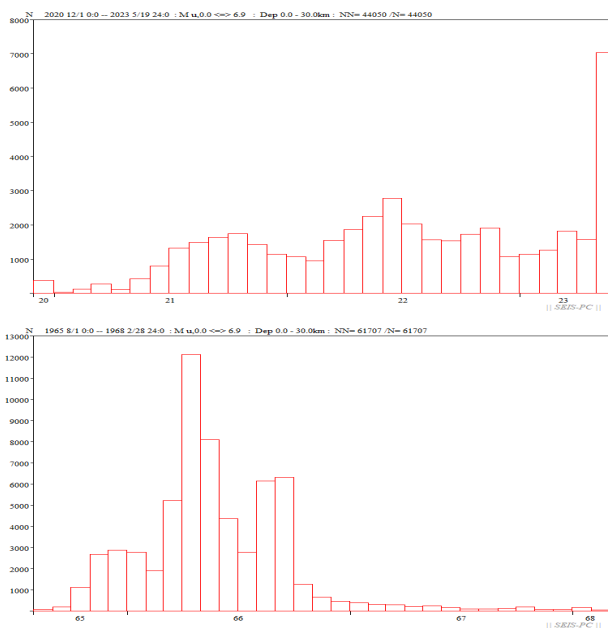
1. はじめに

2020年12月から能登半島北東部で始まった地震活動は、当初は深さ15kmより深いところで起きていた。しかし2021年3月半ばになると深さ15kmより浅い地震が起きはじめ、5月以降はほとんどが深さ10kmから15kmの間になった。そして2023年5月現在も活動が続いており、実に2年6か月間の活動となっている。このような長期間地震活動が続いた例は、1965年8月3日に始まった松代地震がある。長野県が1970年6月5日に群発地震の終息を宣言したが、1967年には収束に向かっていった。したがって、主要な活動期間は、1年5か月程度である。どちらも深部からの流体の上昇によって地震活動が起きたと考えられている。ここでは、活動期間が比較的似ている松代地震と比べることで能登半島の群発地震の特徴を明らかにする。

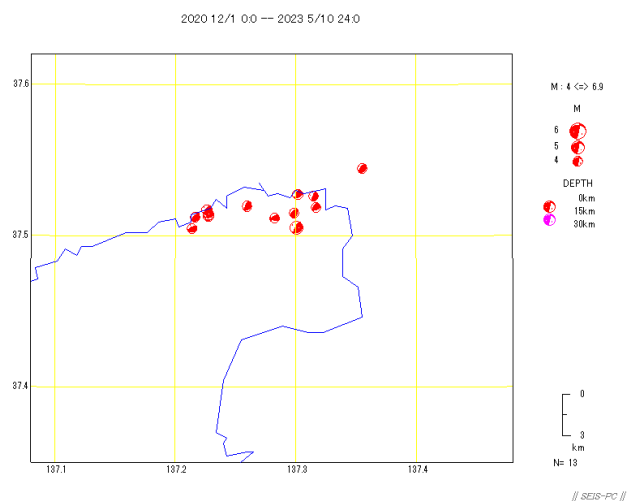
2. 能登半島群発地震について

能登半島群発地震は、活動期間が異常に長いだけでなく、最大地震が起きたのも異常に遅い。能登半島北東部群発地震の最大地震は、2023年5月5日のM6.5地震で、活動開始からなんと約29か月後である。それまでで活動期間が長かった松代群発地震でも、1966年4月5日のM5.4地震で、活動開始から約7か月後であった。このように最大地震の発生に至るまでの時間が長かったことも能登半島群発地震の特徴である。

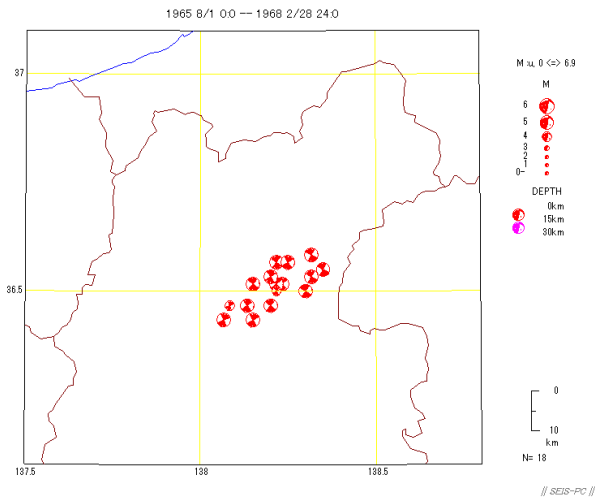
さらに応力場についてみると、気象庁による地震の発震機構解データから能登半島北東部で起きた地震群の応力方向を見ると、図2に示したようにNW-SE方向に圧縮軸をもつ逆断層型である（残念ながら5月5日のM6.5の発震機構解はまだ発表されて無く、この図には含まれていない）。一方、松代群発地震の地域では図3に示したように東西圧縮の横ズレ型である。



第図1：上図は、能登半島群発地震の気象庁震源数の月別変化。下図は松代群発地震の月別有感地震数の変化。能登半島群発地震の場合は異常に活動期間が長いことが分かる。



第図2：気象庁による能登半島北東部のM4以上の地震の発震機構解のビーチボール表示。ほとんどがNW-SE方向で水平に近い圧縮軸をもつ逆断層型である。



第3図：気象庁による松代群発地震のM4以上の地震の発震機構解のビーチボール表示。ほとんどが東西方向に圧縮軸を持つ横ズレ型。

3. 議論

これまで見てきたように能登半島群発地震も松代群発地震も深部からの流体の上昇によって地震活動が引き起こされた現象と考えられるが、活動の様子はかなり異なっている。その原因は、両群発地震が起きている地域の応力場が異なっているからと考えられる。

まず地下深部から流体が上昇する場合、その地域の主圧縮軸に沿った方向が選ばれる。例えば、松代群発地震の場合は東西方向が選ばれる。次にそれが面的に広がるのは、張力軸の方向に垂直な面である。すると松代群発地震の場合は、張力軸は南北方向であるので、この面は鉛直な東西方向の面となる。この場合は、地下深部からの流体は、速やかに地殻上部へ移動することが出来る。図4の左図のような状態と考えられる。そして浅い所に達した流体はその地域のNE-SW走向の活断層に沿って拡散した。そして、松代群発地震では、地震活動の途中から大量の水が地表にあふれ出てきたことが知られている。

一方、能登半島群発地震では、逆断層場で深部からの流体が上がってきている。すると圧縮軸方向は松代地域と同じ水平でも、張力軸が鉛直方向なので、流体が広がる方向は水平方向になってしまう。この応力場では浅い部分に流体が簡単には流れ込めない。従って、深部からの流体上昇の圧力をなかなか解消できないため、活動期間が長期化してしまっていると考えられる。



第4図：応力場と流体の広がり型の模式図。Tは両力軸の方向を示し、左は長野県北部地域、右は能登半島北東部地域。楕円は流体の広がりやすさを示している。

4. まとめ

能登半島北東部で起きている群発地震を松代群発地震と比べてみた。

能登半島群発地震は、活動期間が異常に長いほか、逆断層地域で起こっていることが松代群発地震とはことなっている。この応力場の違いが、同じような深部からの流体の上昇によって引き起こされた地震活動でも、活動特性の違いを引き起こしたと考えられる。すなわち横ズレ型応力場の松代地区では、流体は比較的スムーズに地殻浅部に上昇できたにもかかわらず、逆断層型応力場の能登半島北東部では、流体は水平方向に広がり易く、浅部へ上昇するのに時間がかかっていると考えられる。

5. おわりに

松代群発地震のデータは、気象庁,1968,松代群発地震調査報告,気象庁技術報告 62 巻,556pp.により、応力場のデータは、気象庁発震機構解データによる。

海洋地質データの統合した管理について

清水 恒子*・坂口 弘訓*・高市 和義*・高美 さゆり*・片山 肇**・井上 卓彦**

Integrated management of marine geological data

Hisako Shimizu*, Hironori Sakaguchi*, Kazuyoshi Takaichi*, Sayuri Takami*,
Hajime Katayama** and Takahiko Inoue**

* 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 ITOCHU Techno-Solutions Corporation (CTC),
KAMIYACHO TRUST TOWER, 4-1-1 Toranomom, Minato-ku, Tokyo 105-6950 Japan. E-mail:
hisako.shimizu@ctc-g.co.jp

** 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and
Technology, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567 Japan.

キーワード： 海洋地質データ, データ統合表示

Key words: Marine geological data, Integrated management

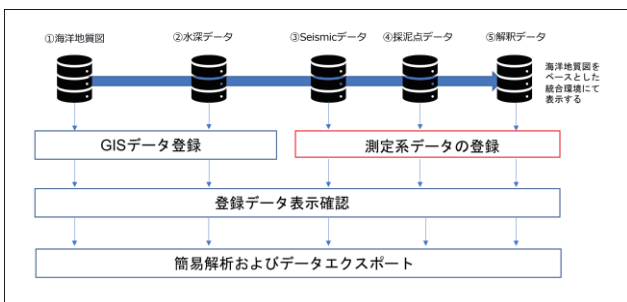
1. はじめに

産業技術総合研究所地質情報研究部門(以下、「産総研」)では、国の知的基盤整備計画の一環として日本周辺海域における海洋地質図の整備を進めている。海洋地質図は防災、海域利用、資源探査等の基礎情報として活用されている。海洋地質図を作成するために取得、分析された様々なデータの一部は、地質情報データベース(<https://www.gsj.jp/researches/geodb/>)の一つとして一般に公開されている。しかしその情報は未公表のものもあり、各種データが連携されていないため、データ利用にあたりデータセットを整理するのに時間を要する状況となっている。本発表では、研究者が既存の海洋地質情報を効果的に活用するため、ひとつのプラットフォームで相互に関連づけて検索、表示する統合表示プラットフォームを開発したことを報告する。

2. 海洋地質データ統合表示

2.1 登録ワークフローの定義

各種データによって、データ登録方法、データの扱い、前処理の有無が異なるため、データ登録のワークフローを定義することとした。第1図にデータ登録のワークフローを示す。



第1図 ワークフロー概念図

登録の基本方針は、海洋地質図面を核として、水深データ、

Seismic データ、採泥点データ、解釈データが統合環境上で表示できることとした。第1図に示す通り、登録方法は GIS データ登録と測地系データ登録の 2 通りのフローとなる。登録したデータ一覧は第1表に示す。

第1表 サンプルデータ一覧

データ項目	データ数	備考
① 海洋地質データ	166	
② 水深データ	4	
③ 反射法音波探査および SBP 探査データ(海洋地質図と同海域)	247	
④ 採泥点データ	682	csv および画像ファイル
⑤ 解釈データ	-	

①海洋地質データおよび②水深データは、UTM 区画毎の切り出しを行う前処理を実施した。③反射法音波探査および SBP 探査データ、④採泥点データ、⑤解釈データは、データの測地系・座標データの確認を行い、必要に応じて前処理を行った。

2.2 データ登録結果

ワークフローに従い、登録を行った GIS データを可視化した。第2図～第4図に可視化の例を示す。尚、データの登録には Landmark 社の OpenWorks、可視化には Decision Space G1 を使用した。

2.3 統合管理データの運用サイクル

各種データを一元管理することにより、登録フローの異なるデータを同時に表示・エクスポートして比較・検討することが可能となる。またデータ更新も簡易化され管理が容易となり、第5図に示すようなシステム運用サイクルが実施できる。

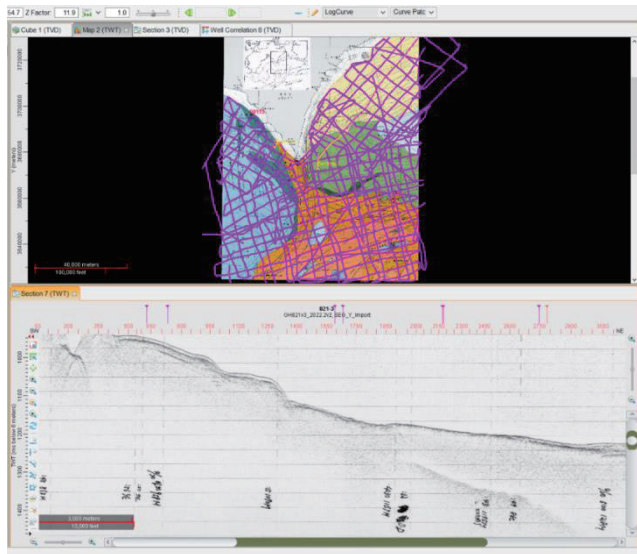
3. まとめ

海洋地質図、水深データ、反射法データ、採泥点のデータを登録して統合表示することができた。本システムにおいて

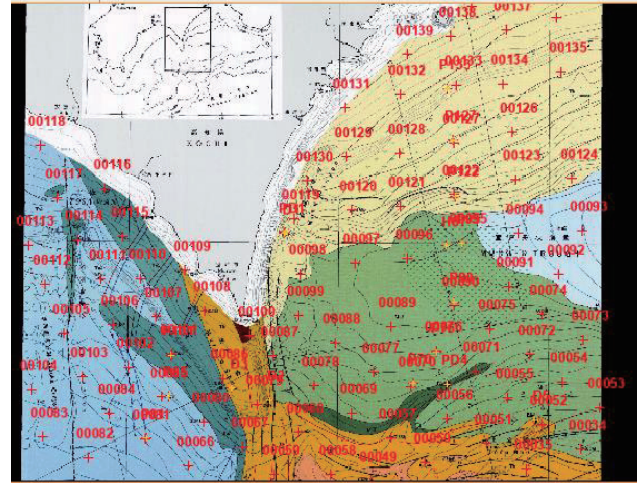
ては、複数のデータを一元管理することが可能であるため、海洋地質情報を効率的に活用することができる。今後、同様のワークフローを用いて、データ登録～可視化～データ出力までのワークフローを効率的に運用していくことが望まれる。より多くのデータ登録を円滑に行うためには、登録データ数やデータサイズをとりまとめ、作業スケジュールを明確にしていく必要がある。

文献

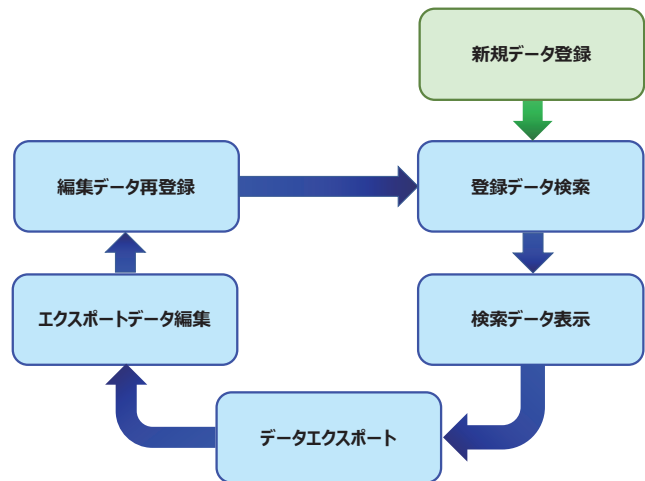
岡村行信・上嶋正人(1986)室戸岬沖海底地質図. 海洋地質図, no.28, pp.32, 地質調査所.



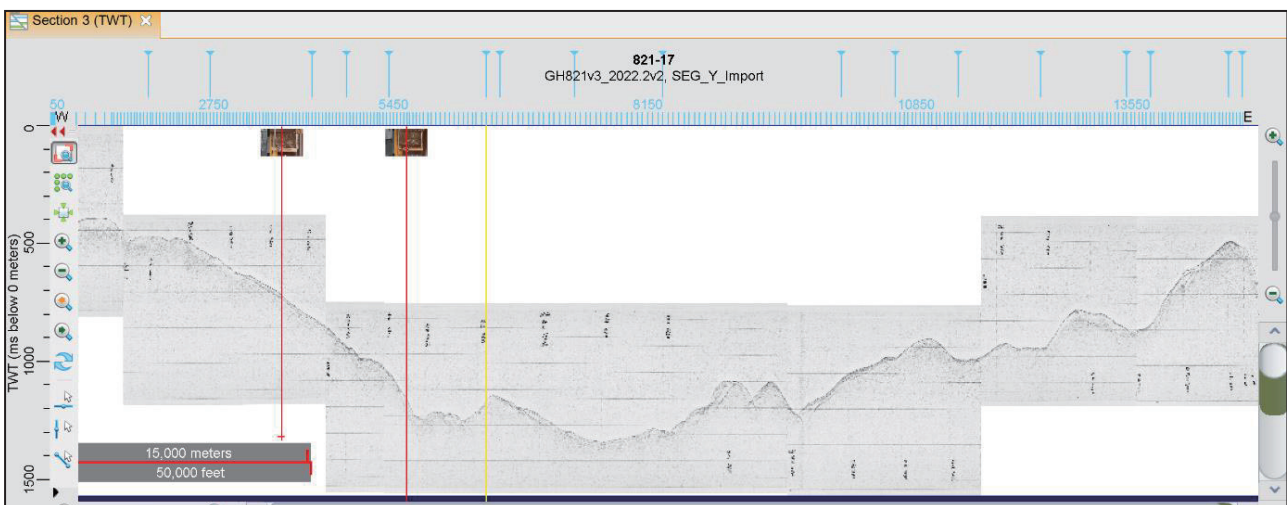
第2図 海洋地質データおよびSBPデータ表示例。画面上部は岡村・上嶋(1986)の海洋地質図および測線図を重ねて表示、画面下部は測線上の seismic 断面を表示。



第3図 採泥点データの位置情報表示例。採泥点の位置と岡村・上嶋(1986)の海洋地質図を重ねて表示。



第5図 運用サイクル。



第4図 SBPデータおよび採泥点データ画像の表示例。赤縦線が採泥点の掘削位置および深さを示す。

北海道訓子府地域の水理地質情報

森野祐助

Hydrogeological information on the Kunneppu area, Hokkaido

Yusuke MORINO

北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所
Hokkaido Research Organization, Research Institute of Energy, Environment and Geology, Kita
19-Nishi12, Kita-ku, Sapporo, Japan. E-mail: morino-yuusuke@hro.or.jp

キーワード：地下水資源, 水理地質情報, 訓子府地域

Key words: Groundwater resource, Hydrogeological information, Kunneppu area

1. はじめに

水道は私達の生活を支えている重要なインフラの一つである。しかし、今後の水道事業は人口減少に伴う収入の減少と設備更新費用の増加で厳しい経営が予想されている。対策手法の一つとして水源を分散させ管路の総延長を短くする手法が検討され、その水源として地下水が期待されている。水理地質情報を解析・整理し情報図として示すことで、地域特性の把握や水源の選定に活用できる。本研究では訓子府地域を対象に地質資料、井戸資料、物理探査資料などを収集し水理地質解析を実施、水理地質構造と水理定数を明らかにし、その結果に基づいた水理地質情報図を試作した。

2. 水理地質構造

訓子府地域の水理地質基盤は下位より白亜系の仁頃層群、始新統の栄森層、中新統の津別層で構成される。容水地盤は中新統の相内層、第四系の更新統、火砕流堆積物、段丘堆積物、沖積層である。帯水層の構造を把握することで効率よく地下水を利用するための井戸の深さなどの設計に活用することができる。ボーリング資料、物理探査資料を用いて作成した第四系基底標高分布図を第1図に、森野・大澤(2019)が作成した水理地質基盤基底標高分布図を第2図示す。

3. 水理定数

3.1 透水係数 (k)

透水係数は地層の透水性を示す指標である。揚水試験結果を収集し(水理地質図幅「北見」および同説明書、北見周辺地域地下水利用適正化調査報告書、独自収集資料)、詳細な連続揚水試験結果があるものはCooper & Jacob(1946)の方法で、詳細な揚水試験結果がないものはLogan(1964)の方法で求めた透水量係数をスクリーン長で割り、透水係数を算出した(第3図)。

3.2 比湧出量 (Sc)

比湧出量(Sc)は井戸において揚水で生じた単位水位降下量あたりの揚水量(揚水量/地下水位降下量)で示す。このため井戸構造の影響を受けた値だが、地下水利用(揚水)に対する地下水位の低下の度合いを示すため、帯水層の性状を把握する

場合は揚水試験結果からえられた透水量係数より有用なことがある。収集した揚水試験結果の揚水量と水位降下量(静水位と動水位の差)を用いて比湧出量を算出した(第4図)。

4. 水理地質情報図の試作

4.1 地下水の生産性マップ

地下水の利用しやすさは地層の透水係数が重要な要素の一つである。また既存井戸の揚水実績からどれくらいの揚水量が期待できるかは比湧出量が目安になる。以上のことから本研究では地下水の生産性を示す情報として表層地質の透水係数と比湧出量の分布を示した(第5図)。

表層地質の透水係数は 1×10^{-4} オーダーの地域が多いが、比湧出量は多くの地点で $50 \text{m}^3/\text{day/m}$ を下回っている。これは透水性の良い表層地質の層厚が薄いため、表層地質より下位の透水性の低い($1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ オーダー)の地層から採水しているからである。

4.2 地下水の貯留容量マップ

地下水の貯留容量を推定するために帯水層の厚さと有効間隙率の積を求めた。帯水層の厚さは地形面と第四系堆積物基底標高分布の差分を第四系堆積物の厚さとし、第四系堆積物基底標高と水理地質基盤基底標高の差分を相内層の厚さとした。有効間隙率は第四系堆積物を0.2、相内層を0.08とした。また、地下水収支を検討する上で重要な年間降水量(国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構のメッシュ農業気象データシステム)を破線で示した。作成した貯留容量マップを第6図に示す。貯留容量マップは深度方向の貯留容量がm単位で示され、これに面積をかけるとその地点の地下水貯留容量(m^3)が計算できる。地下水貯留容量は大谷周辺で最も大きく約60m、駒里・豊地周辺で約10m以下と小さく、帯水層厚の分布と調和的な結果になった。

5. まとめ

本研究では訓子府地域を対象に水理地質解析を実施、その結果から水理地質情報図を試作した。地下水生産性マップでは多くの地域で表層地質の透水係数は 1×10^{-4} オーダーだが、比湧出量は多くの地点で $50 \text{m}^3/\text{day/m}$ を下回っていた。地下水貯留容量は大谷周辺で最も大きく約60m、

駒里・豊地周辺で約 10m 以下と小さく、帯水層厚の分布と調和的な結果になった。

本研究で作成した 2 つの情報図に地下水位分布や鉄などの水質分布の情報と組み合わせることで地下水開発を検討する指標になる。これらの情報図は地下水利用時の地域的な特性を把握する際に有効だと考えられる。

文 献

Cooper, H.H. and C.E. Jacob (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, Am. Geophys. Union Trans., vol. 27, pp. 526-534.

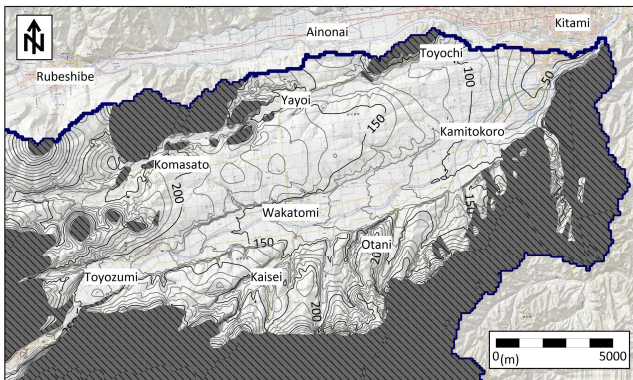
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構メッシュ農業気象データシステム. <https://amu.rd.naro.go.jp/> (2013 年 5 月 22 日確認) .

Logan, J. (1964). Estimating Transmissibility from Routine Production Tests of Water Wells. Ground Water, 2, 35-37.

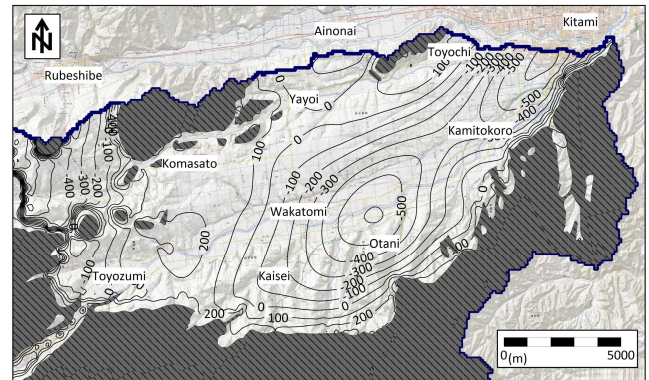
森野祐助・大澤賢人 (2019) 流域の水利地質構造モデルの作成, (一財) 北海道河川財団研究所紀要, XXI, pp.33-36.

小原常弘, 和田信彦, 横山英二, 松浪文博, 佐藤巖 (1980) 北海道水利地質図幅説明書, 第 5 号, 「北見」, 北海道立地下資源調査所, 53p, .

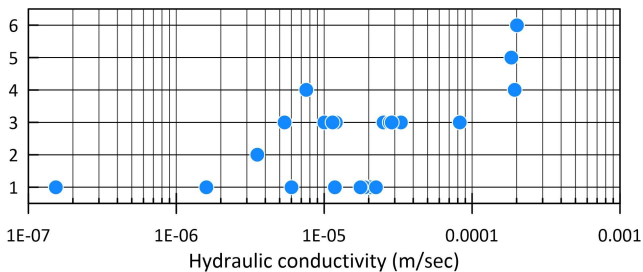
札幌通商産業局, 1988, 北見周辺地域地下水利用適正化調査報告書. 171p.



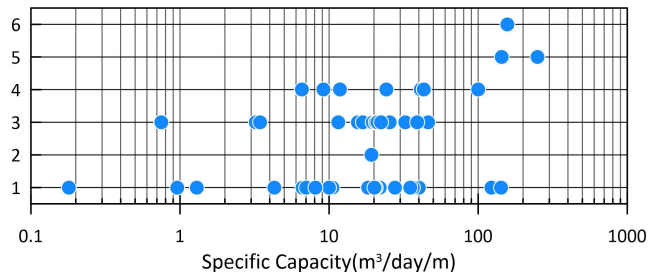
第 1 図 第四系堆積物基底標高分布図



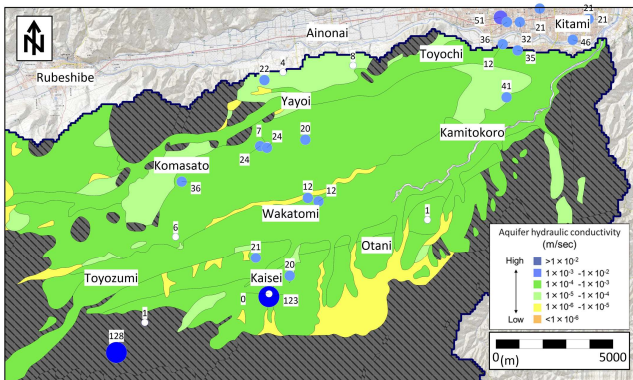
第 2 図 水利地質基盤基底標高分布図 (森野・大澤, 2019)



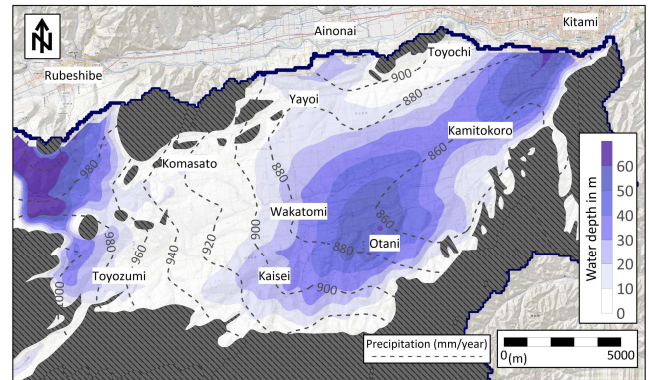
第 3 図 各地層の透水係数 (k)



第 4 図 各地層の比湧出量 (Sc)



第 5 図 表層地質の透水係数と比湧出量 (Sc) 分布
プロットの大きさとラベルは比湧出量 (m³/day/m) を示す



第 6 図 地下水の貯留容量と降水量分布

深層学習を用いた物理探査データからの地温分布推定：数値テスト事例

山本壮馬*・後藤忠徳**

Subsurface Temperature Distribution inferred from Geophysical Exploration Data using Deep Learning: Numerical Tests

Soma Yamamoto* and Tada-nori Goto **

* 兵庫県立大学大学院理学研究科 Faculty of Science, Univ. Hyogo, 2167, Shosha, Himeji, Hyogo, 671-2280, Japan. E-mail: syamamoto@earth-univ-hyogo.jp

** 兵庫県立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Univ. Hyogo, 2167, Shosha, Himeji, Hyogo, 671-2280, Japan. E-mail: tgoto@earth-univ-hyogo.jp

キーワード： 深層学習, 地中温度分布, 比抵抗, 地震波速度

Key words: Deep learning, Subsurface Temperature, Resistivity, Seismic velocity

1. はじめに

地下の温度分布は、地熱開発において重要であり、熱源の発見や、地熱エネルギー開発時の規模の検討などに使用されている。特に、地熱発電開発前後の熱水循環パターンの変化や、地熱発電の持続性を議論するための基礎情報である。温度分布は主に、試掘時や開発時の坑井での直接的な温度測定に基づくことが多い。これらの坑井には深さ3000 mを超えるものも見られるが、掘削には多額の費用と環境負荷が伴うため、坑井数は限定されることが多い。そこでより高精度・高分解能での温度分布の推定を目的として、ニューラルネットワークを用いて温度を推定する試みが近年見受けられている。例えば Spichak and Zakharova (2012)や Maryadi and Mizunaga (2022)では、坑井位置で比抵抗と温度との関係を学習させて、地表で得られる比抵抗データから坑井以外の温度推定を行っている。Gu et al. (1997)では、ニューラルネットワークの学習にセミバリオグラムを加えることで、坑井の温度データのみを用いた地中温度の推定が提案されており、これによって坑井以外の温度を推定する手法に関する情報を得ることができる。しかしながら、既存データに対して物理探査で得られる地震波速度分布を加えたり、ニューラルネットワークの最適化によって、温度の推定精度の向上が期待されると考えられる。そこで本研究では、温度推定値の最適解が得られるようなニューラルネットワークの計算モデルを作成し、その手法に関する議論を試みた。また、地表観測で得られる比抵抗と地震波速度を用いて地中温度の推定を行い、この手法で坑井以外の地点での温度が推定できるかどうか検証を行った。

2. 手法

2.1 使用データ

深部流体の温度シミュレーションソフトである Hydrotherm (USGS 提供) とそれに含まれている温度データを用いた。水平距離が $x = -1.88 \sim 7.25$ km, 深さが $z = 0 \sim 1.97$ km であり (図 1), 高温岩体 (熱源) を $x = -0.73 \sim 0.73$ km, 深さ 2 km 以深に置いた。初期温度は 950 °C, 透

水係数は高温岩体を 1.0×10^{-14} cm/s, 岩盤を 1.0×10^{-11} cm/s とし, 10,000 年後の温度構造を使用した。比抵抗と地震波速度データは、この温度分布を基に、既存の岩石の室内測定結果に基づいて作成した (図 2 および 3)。さらに地下構造を実際の地熱地域に類似したものに近づけるために、より複雑な地下構造 (基盤+堆積層) に対する、温度推定も試みる。具体的には、数値シミュレーションにより温度分布を求め、室内実験結果から比抵抗・地震波速度といった観測データを作成して、ニューラルネットワークを用いて地温温度分布の推定を試みた。

2.2 ニューラルネットワーク

入力層(入力データ)は水平・鉛直位置の情報 (x と z)、比抵抗 (ρ または $\log \rho$)、地震波速度 (v_p) を採用し、出力層(出力データ)は温度 T とした。中間層と出力層における活性化関数として ReLU 関数を用いた。使用した学習アルゴリズムは一般的な誤差逆伝播法と勾配降下法である。地中の各地点での温度や比抵抗などのデータセット 121 個のうち 22 個 (坑井 2 本分) を、その学習が上手く行われたか検証するテストデータとして (図 1)、残る 99 個を学習データとして使用した。本研究では、地中の各点でのデータセット $\{x, z, \rho$ または $\log \rho\}$ に対して、入力データの組み合わせの変化や、ニューラルネットワークを構築するパーセプトロンの数 (中間層の数 & 中間層 1 層あたりのパーセプトロン数) を変化させた上で、地温分布推定に最も適切な計算モデルの議論を行った。さらにこれらのデータセットに v_p を追加して、同様に地中分布推定を行った。

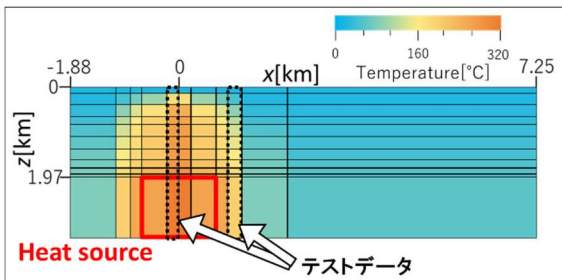
3. 結果と考察

入力データが位置情報 x と z , 比抵抗 $\log \rho$ の場合について深層学習により温度推定を実施した。本研究の場合では、パーセプトロン数が 20 個のときに、最も地温分布推定の精度が高かった (図 4)。Cost function と RMS misfit の値はパーセプトロン数の変化によって変動が見られるが、パーセプトロン数 20 個のとき、両方の値が小さくなっていることから、このときが最適な計算条件であると考えられる。

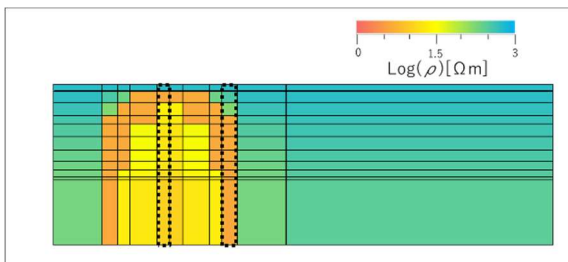
さらに、地震波速度と比抵抗の両方の空間分布がある場合は、推定温度は合成温度とより良い一致を示した。この場合は、推定値と正解値の誤差は平均して 1 °C 未満であった。最適な中間層は 3 層であったため、いわゆる深層学習（ディープラーニング）と言える。このような高精度な温度推定に成功した理由は、本研究で作成した地震波速度データが温度と密接（線形）な関係を仮定したためであると考えられる。このような温度との関係が比較的単純な物性値を用いたために、想定した値と非常に似た地温温度分布が出力されたと考えられる。比抵抗は、温度のほかにも様々な因子に影響されて変化するため、位置情報と比抵抗だけでは、この方法を用いて温度推定を行うと精度が低下することが分かった。

4. まとめ

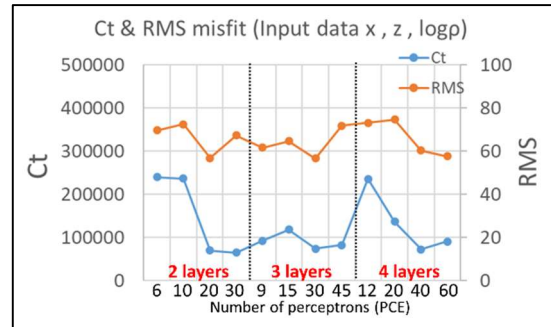
ニューラルネットワークのチューニングと、入力データに位置情報・比抵抗・地震波速度を適用して、どの計算モデルが地中温度分布を高い精度で出力できるか、また未知の温度を推定できるかについて議論を行った。パーセプトロン 20 個の計算モデルにおいてコスト関数, RMS 残差ともに小さくなることが分かった。また、地震波速度を追加して入力データを標準化して温度を推定し、入力データの組み合わせについて議論した。地震波速度を追加すると、推定温度は合成温度と良い一致を示した。今後は、地震波速度を温度以外の作用も追加して再度温度を推定する、あるいはディープラーニングと異なる機械学習の適用を検討していく必要があると考える。また実際の温度データや物理探査データに対して本手法の適用を行う予定である。



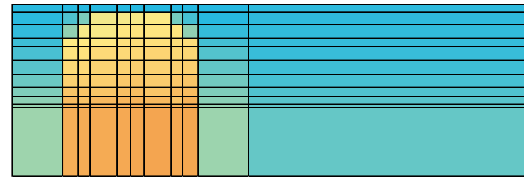
第 1 図 作成した地温分布. 点線部の温度は学習には使用していない



第 2 図 入力データの一つである比抵抗(log ρ)分布



第 3 図 Cost function & RMS misfit (log ρ 追加)



第 4 図 地温分布の推定 (x, z, log ρ を入力に使用)

文 献

Gu, B., Koike, K., & Ohmi, M. (1997). Distribution analysis of metalliferous vein using artificial neural network. *Geoinformatics*, 8(1), 15-21.

Maryadi, M., & Mizunaga, H. (2022). Subsurface temperature estimation in a geothermal field based on audio-frequency magnetotelluric data. *Exploration Geophysics*, 53(3), 275-288.

Spichak, V., & Zakharova, O. (2012). The subsurface temperature assessment by means of an indirect electromagnetic geothermometer. *Geophysics*, 77(4), WB179-WB190.

5 万分の 1 岡山県地質図データベース更新の試み —更新統 ”山砂利層” から古第三系吉備層群へ—

田中 元*, 田邊 信男*, 大嶋優斗*, 鈴木茂之**, 能美洋介***

Attempt to update 1:50,000 Okayama Prefecture Geological Map Database —From the Pleistocene " Mountain Gravels " to the Paleogene Kibi Group—

Hajime TANAKA *, Nobuo TANABE *, Yuto OSHIMA *,
Shigeyuki SUZUKI **, and Yousuke NOUMI ***

*西部技術コンサルタント株式会社 Seibu Engineering Consultants Co., Ltd., Okayama, 700-0977, Japan.

URL : <http://www.seibuct.co.jp>

**岡山大学 特命教授・名誉教授 Okayama University, Department of Earth Sciences, Okayama University, Okayama, 700-8530, Japan. E-mail: zysuzuk@cc.okayama-u.ac.jp

***岡山理科大学 Okayama University of Science, Okayama, 700-0005, Japan. E-mail: y_noumi@ous.ac.jp

キーワード : 5 万分の 1 岡山県地質図 , データベース更新 , ” 山砂利層 ” , 古第三系吉備層群

Key words : 1:50,000 Okayama Prefecture Geological Map, Update Database,
" Mountain Gravels ", The Paleogene Kibi Group

1. はじめに

西部技術コンサルタント(株)では、5 万分の 1 岡山県地質図を企業の社会貢献活動の一環としてHPで公開している。初版は 2008 年であるが最新のものは 2020 年の第 1 回改訂版である。本地質図にはこのように必要に応じてデータベースの更新も行っていくとすること希有な基本理念がある。一方、古第三系吉備層群等の研究が進みつつあり、徐々に新たな層序区分が明らかとなる中で、改訂版岡山県地質図でも吉備層群等の分布や層序についての部分再改訂への取り組みが始まっている。

講演では、5 万分の 1 岡山県地質図の紹介を行うとともに、現在取り組んでいる再改訂の内容について具体的に述べる。

2. 5 万分の 1 岡山県地質図の紹介

岡山県地質図の初版(岡山県内地質図作成プロジェクトチーム, 2008)は、故光野千春岡山大学名誉教授(2001 年逝去)が 1991 年の大学退官後に研究の集大成となる岡山全県の 5 万分の 1 地質図(全 21 図幅)の発刊をめざして作成されていたもので、急逝に伴う空白部分を有志プロジェクトチームが埋めて 2008 年に発刊したものである(第 1 図)。その後の改訂版(岡山県内地質図作成プロジェクトチーム, 2020)は、初版発刊の際に中心的な役割を担っていた光野先生の教え子である定金司郎氏が主に改訂を手がけた。改訂内容は、初版で更新統とされていた“山砂利層”が古第三系吉備層群に定義されたこと(鈴木ほか, 2003)、瀬戸内沿岸地域の中新統とされていた海成層が古生物年代より古第三系とされた(田中ほか, 2003)ことによる凡例の更新が主なもので、一部で新たに見つかった海成層や断層の分布も追記された(第 2 図)。

3. 吉備層群等の部分再改訂への取り組み

かつて“山砂利層”とされてきた地層は、岡山北部地域周

辺における最近の研究で少なくとも 3 つの異なる地質時代の河成層であることが示された(第 3 図)(田中・鈴木, 2023)。その結果、岡山北部図幅内では改訂版岡山県地質図と研究成果との間で地質分布と層序に関する相違点が明らかとなってきた(第 4 図)。

このことから、相違点が明らかになった岡山北部図幅を皮切りに部分再改訂を行うことが望ましいと考えられたことから、その成果を反映させる取り組みを進めている。

4. おわりに

部分再改訂の作業は始ったばかりではあるが、並行して未研究地域の“山砂利層”に対する研究が進められている。今後、研究の進展によって周辺図幅の部分再改訂が必要となってきた場合には、順次再改訂の範囲を拡げていくことも考えている。

文 献

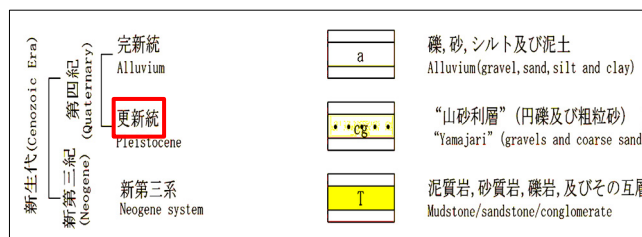
岡山県内地質図作成プロジェクトチーム, 2008: 岡山県地質図 5 万分の 1 図幅および説明書. 西部技術コンサルタント株式会社.

岡山県内地質図作成プロジェクトチーム, 2020: 改訂版岡山県地質図 5 万分の 1 図幅および説明書. 西部技術コンサルタント株式会社.

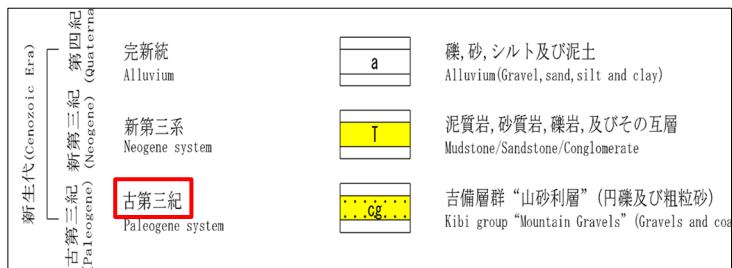
鈴木茂之・壇原徹・田中元, 2003: 吉備高原に分布する第三系のフィッシュトラック年代. 地学雑誌, vol.112, pp.35-49.

田中元・鈴木茂之・宝谷周・山本裕雄・壇原徹, 2003: 吉備高原周辺の古第三系に関する最近の知見とその古地理学的意義. 岡山大学地球科学研究報告, vol.10, no.1, pp.15-22.

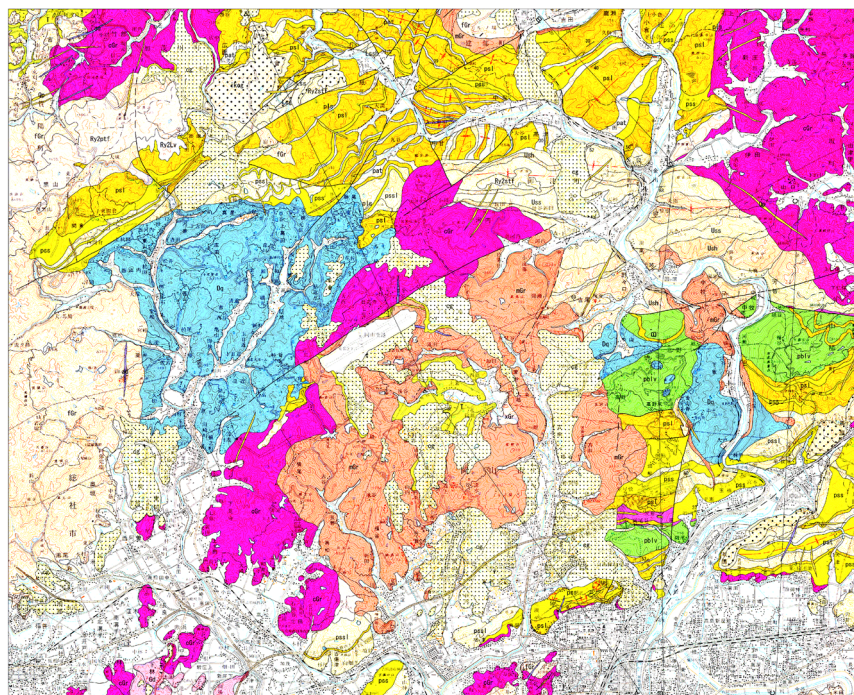
田中元・鈴木茂之, 2023: 岡山県吉備中央町賀陽周辺の古第三系～新第三系の地質と吉備高原面のゆるやかな曲隆. 岡山大学地球科学研究報告, vol.29, no.1, pp.1-27, 印刷中.



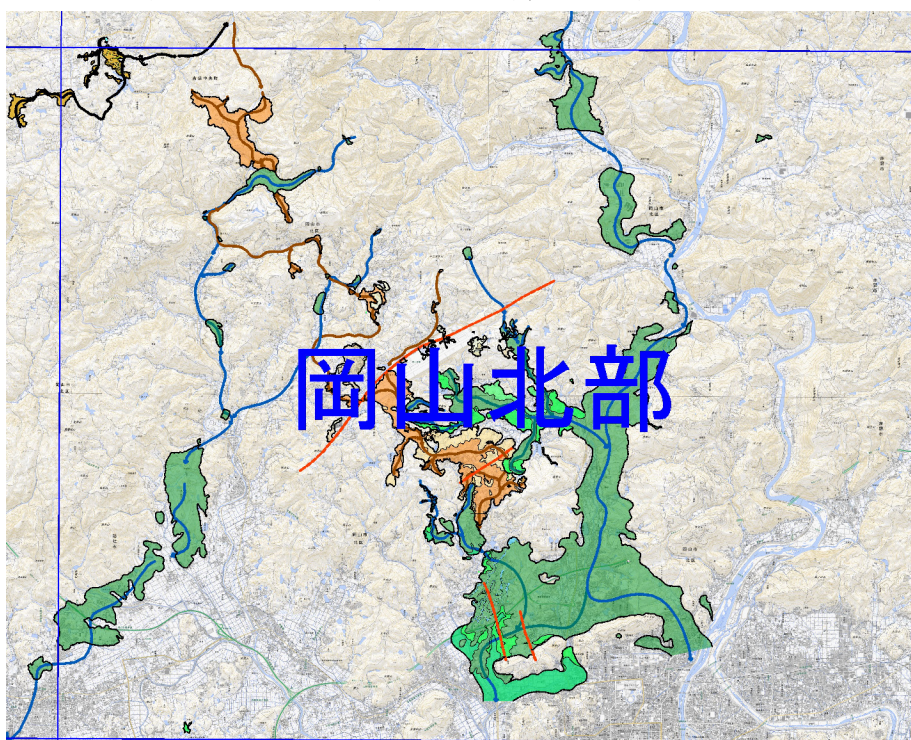
第1図 初版 岡山北部図幅の凡例
(岡山県内地質図作成プロジェクトチーム, 2008)



第2図 改訂版 岡山北部図幅の凡例
(岡山県内地質図作成プロジェクトチーム, 2020)



第1図 初版 岡山北部図幅 (岡山県内地質図作成プロジェクトチーム, 2008)
着色部のうちドット付薄黄色が山砂利層, 記号Tの黄色が中新統を示す。



第4図 岡山北部地域周辺の第三系分布図と古流路 (田中・鈴木, 2023)
第三系に着色, 薄茶: 矢金層, 緑系: 津高層・足守層, 橙・肌色系: 富吉層

地質時代		年代層序	FT年代 (Ma, 誤差: 1σ)
中新世	後期		
	中期	有漢層・日応寺層	15.5 ± 1.0 ¹⁾
漸新世	前期	備北層群	
		塩町層 [*]	22.3 ± 2.4 ³⁾ 22.9 ± 2.2 ¹⁾
		矢金層	24.6 ± 1.1 ¹⁾ 25.6 ± 0.9 ¹⁾
始新世	後期	津高層	27.1 ± 1.5 ²⁾ 27.4 ± 1.9 ²⁾
	前期	吉備層群	足守層 賀陽層?
古新世	後期	富吉層	34.0 ± 2.7 ²⁾ 34.3 ± 1.8 ²⁾ 35.8 ± 1.4 ²⁾
	前期		

第3図 岡山北部地域の第三系層序と年代
(田中・鈴木, 2023)

情報地球学におけるソーシャルメディアコンテンツと 3D-Movie の 裸眼立体視 Web アプリケーションによる利活用

領木邦浩*

Utilization of Social Media Contents and 3D-Movies in Information Geology with Stereoscopic Web Application

Kunihiro RYOKI*

* 職業能力開発総合大学校能力開発院基礎系 Department of Fundamental Sciences, Faculty of Human Resources Development, Polytechnic University of Japan, 2-23-1 Ogawa-nishimachi, Kodaira, Tokyo, 187-0035, Japan. E-mail: k-ryoki@uitech.ac.jp

キーワード： 立体視, HTML, 交差法, 3D コンテンツ, VR

Key words: Stereo vision, HTML, Crossing method, 3D contents, Virtual Reality

1. はじめに

近年の情報科学・情報工学の応用と民生分野での活用は「情報革命」の名に値する。特に3Dメディアの充実に伴うVR技術の普及は地球学分野における教育・研究に大きな影響を与えてきている。地球という立体を研究対象とする性質上、地球学ではその研究対象を立体的に把握し表現することが不可欠である。しかし、現今のVR技術を見ると、視覚的に立体としてこれらのコンテンツを認知するためには通常3Dゴーグルや裸眼で3D映像を立体視するためのディスプレイなど特別な装置を必要としている。

写真の技術が世に出た頃、間もなくこれをステレオグラムとして立体視する技術が考案された。そして、ほどなく技能訓練によって裸眼で立体視が可能であることが理解された。しかし、技能習得が必要なため、長らく人口に膾炙することは少なかった。最近ではWWWを通じた情報流通によってこの技法が若干紹介されることもあるものの、普遍的に知られているとは言い難い。

この状況を受けて、領木(2019)は地理院地図の機能の一つである地理院地図Globe(国土院, 2017)を裸眼立体視するためのビューアStereoscopic Viewer(以後SVw, 第1図)を作成し、その後、その活用に対応してきた(領木, 2020)。ここでは、SVwをさらに応用発展させ、教育研究現場での使用を念頭に置いたソーシャルメディアコンテンツまたは3D-Movieを裸眼で立体視するためのビューアの開発と地球学の研究・教育における利活用の展望について報告する。

2. 立体視の原理

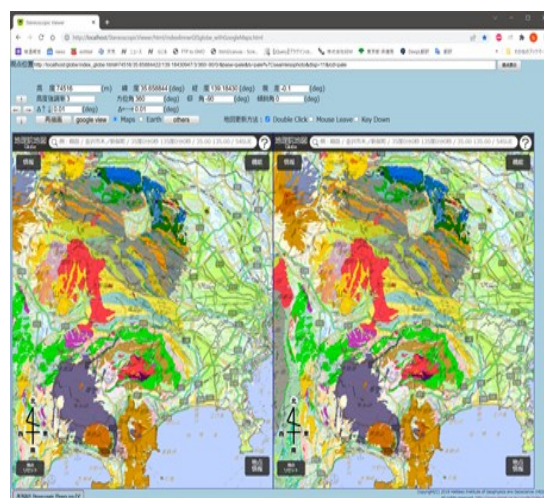
二図面を使用した絵画や版画などの立体視は写真の発明より古く、写真の普及に伴い立体写真が一時盛んに行われた(広内, 2013)。立体視のために用いる写真画像は、地図作成時に用いられるオルソ画像ではなく、立体対写真(松野, 1976a)である。

地図や空中写真という紙媒体を用いた裸眼による立体視

は、特別な装置が不要であり、野外調査や教育の場で利用されてきた。筆者の大学生等への指導経験に基づくと、このための技能は集中すれば30分程度の訓練で多くの人が習得できる。しかし、これを習得するには練習以外にない(松野, 1976b)とされる。ヒトの眼球は内側に斜交させやすいが外側には向けにくく、瞳孔距離はおおむね6.5cm内外であるため、広い範囲を立体視する場合には左右の視線をクロスさせる交差法が用いられる。

3. 回転体や視点が平行移動する動画の立体視

地理院地図Globeの画像は地球回転体の一部を一点透視図法で描いたものである。視点が異なる二枚の地理院地図Globeの画像は立体対写真に相当するため、SVwではこれ



第1図 SVwの使用例 地理院地図GlobeのWWWページを緯度方向に1度ずらして表示してある(2023年5月20日閲覧)。



引用は上記コードに記載されている

を対画像として表示する。また、SVwには回転体の動画や視点平行移動する動画を再生して立体視を行う機能が追加されている。一方、ローカルマシンに収納された3D-Movieの再生は<iframe>タグで実行できないなどHTML言語の制約のため実装されていなかった。

4. 教育現場での使用を目的としたステレオビデオビューワの開発

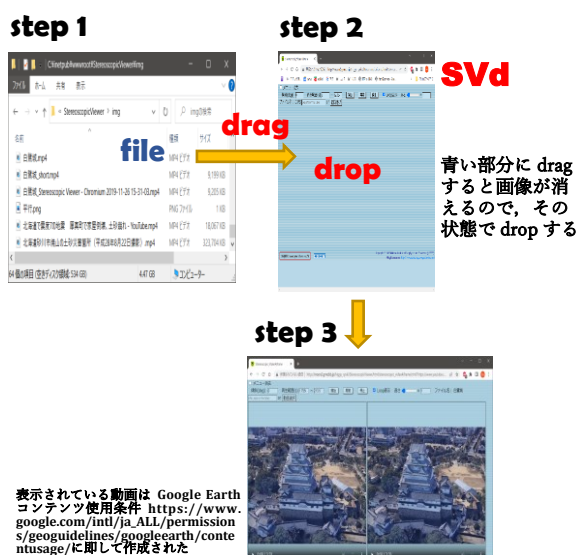
上述の欠点を補うため、領木(2022)はローカルマシン内外の映像ファイルを表示し、教育現場での使用を目的とした裸眼立体視用アプリケーションStereoscopic Videoを作成した。SVdでは2つの画像はそれぞれHTMLの<iframe>タグを用いてYouTubeのコンテンツを描画している。一方、ローカルマシン内にある映像ファイルを表示する場合はアクティブなタグを<video>に切り替えている。

今回、集合教育で使用する際に多数の学習者に対してプロジェクト等によって大画面で一斉に映像を提示する場合や高等教育の場で教育研究に使用する場合等の必要性に応じ、下記の機能を実装した。

- ・再生範囲の指定
- ・Loop表示有無の指定
- ・再生速度の設定
- ・URLまたはパス・ファイル名の入力テキストボックス
- ・ローカルファイル指定フォルダ表示スイッチ
- ・ローカルファイルのDrag & Drop機能(第2図)
- ・YouTubeコンテンツのDrag & Drop機能(第3図)
- ・映像画面の傾斜機能(ヒトの目は横方向に視差のある対画像だけが立体視できるため、映像の変化方向が縦方向の場合に立体視するには画面の傾斜機能が必要となる)

近年、360°カメラの普及が進み、これらを用いて撮影した動画を附属アプリ(例えばInsta(2023)など)で少し手を加えてYoutubeにアップロードすれば簡単に360°VRコンテンツが作成できるようになった(Youtube, 2022)。教育・研究の場においてこのような自作コンテンツを作成した場合、SVdを通じて再生すれば多くの学習者・視聴者に一斉かつ集合的に閲覧させることが可能である。

裸眼用ステレオビデオビューワSVdの表示画面例は第2図および第3図中step3に掲げられている。



第2図 SVdへのローカルファイル表示方法

5. おわりに

地理院地図Globeを立体視するビューワSVwを発展させ、ローカルマシン内にある映像ファイルや外部サーバにあるYouTubeコンテンツなど多様なソースを裸眼立体視するためのビューワSVdに教育研究の場で利活用する際に必要な機能を追加実装した。これによって地球学における色々な現象の把握がより明確に行えるようになった。SVwとSVdのコードはGitHub(2023)に公開されている。今後はこれらの使用マニュアルを作成して公開する予定である。

文 献

- GitHub, Inc. (2023) About repositories, <https://docs.github.com/en/repositories/creating-and-managing-repositories/about-repositories> (2023.5.20.閲覧).
- 広内哲夫(2013)立体視の原理と3D技術への応用, 情報システム学会誌 Vol. 8, No. 2, pp. 5-16.
- Insta(2023): Insta360 STUDIO 2023, <https://www.Insta360.com/jp/download/insta360-oners> (2023.5.20.閲覧).
- 国土地理院(2017)地理院地図Globeの正式公開, <http://www.gsi.go.jp/common/000185126.pdf> (2023年5月20日閲覧).
- 松野久也(1976a)観察方法, 写真地質, 実業広報社, pp. 30-34.
- 松野久也(1976b)裸眼立体観察, 写真地質, 実業広報社, pp. 39-41.
- 根本正美(2006)地図を立体視する, 帝国書院高等学校地理・地図資料, 2006年4月号, pp. 21-24.
- YouTube(2022)YouTubeの取り組み, YouTubeのしくみとは?, https://www.youtube.com/intl/ALL_jp/howyoutubeworks/ (2023.5.20.閲覧).
- 領木邦浩(2019)地理院地図Globeを利用したシームレス地理情報ステレオビューワ, 日本情報地質学会講演会講演要旨集, 30, 31-32.
- 領木邦浩(2020)シームレス地理情報ステレオビューワの応用と展望, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, H-TT19-P03.
- 領木邦浩(2022)単一映像の立体視用ビューワの開発と教育訓練への展開, JpGU 2022, HTT21-P01.



第3図 SVdへのYouTubeコンテンツの表示方法

キュリー点深度推定における 区分線形関数を用いたノイズ除去アルゴリズムの実装

上田 大輝*・根本 達也*・ベンカテッシュ ラガワン*

Implementation of Denoising Algorithm for Curie Point Depth Estimation Using Piecewise Linear Function

Daiki UEDA*, Tatsuya NEMOTO* and Venkatesh RAGHAVAN*

* 大阪公立大学大学院理学研究科地球学専攻 Department of Geosciences, Graduate School of Science,
Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.
E-mail: sy23073o@st.omu.ac.jp

キーワード：地熱資源，キュリー点深度，区分線形関数，スペクトル解析

Key words: Geothermal resource, Curie Point Depth, Piecewise Linear Function,
Spectral Analysis

1. はじめに

近年，カーボンニュートラルの実現のために，地熱エネルギーは有望な資源として注目されている。しかし，地熱は目に見えない地下資源であり，複数の掘削調査が必要となるため，時間を要し，開発コストおよびリスクが高いという現状がある。これらの問題を解決するためには，物理探査等のデータ処理や解析技術の向上が不可欠であり，これらは地熱有望地の特定，地下深部の温度分布の解明及び開発コスト低減に貢献できる。

地熱探査では，磁気異常データを解析してキュリー点深度に相当する深度をもとめるキュリー点深度解析法がある。岩石は一般に磁性を有しており，岩石の磁化は温度の上昇とともに減少し，キュリー点と呼ばれる温度を超えると磁性を失う。キュリー点深度は最も一般的な強磁性体鉱物である磁鉄鉱のキュリー点（約 580 °C）に支配されると考えられている。すなわち，キュリー点深度を明らかにすることで，約 580 °C の深度を求めることができる。

Mather and Fulla (2019) はキュリー点深度推定プログラム「PyCurious」を用いて推定を行った。しかし，このプログラムは実測値を扱う際のノイズを考慮しておらず，適切に推定できない。そこで，本研究では区分線形関数を用いたノイズ除去アルゴリズムを実装した。

2. キュリー点深度解析法の概要

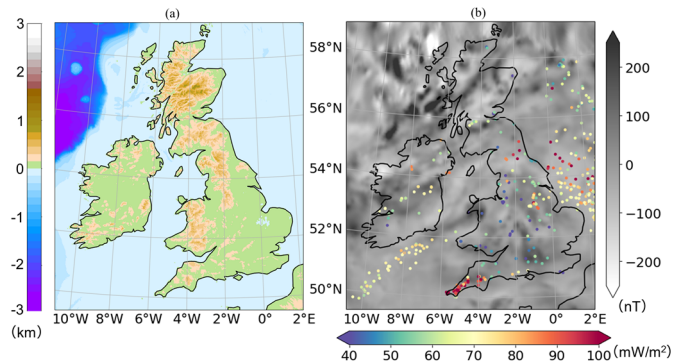
磁性体の深度は，磁気異常のスペクトル解析から推定される。Bouligand *et al.* (2009) は動径方向のパワースペクトルの対数の平均 RAPS (Radially Averaged Power Spectrum) を次の式 (1) で表される磁性体の統計モデルを提案しており，PyCurious に実装されている。

$$\Phi(k) = C - 2kz_t - (\beta - 1) \ln(k) + [-k\Delta z + \ln(\frac{\sqrt{\pi}}{\beta} (\frac{\cosh(k\Delta z)}{2} \Gamma(\frac{1+\beta}{2}) - K_{\frac{1+\beta}{2}}(k\Delta z) (\frac{k\Delta z}{2})^{\frac{1+\beta}{2}}))] \Gamma(1 + \frac{\beta}{2}) \quad (1)$$

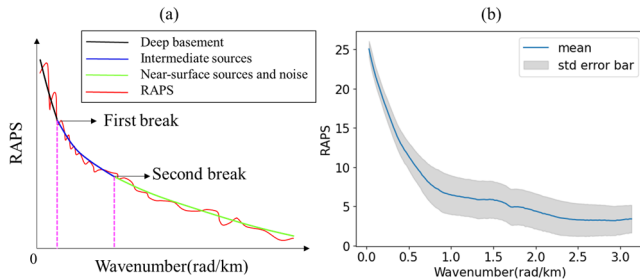
ここで， k は波数， $\Phi(k)$ は磁気異常のパワースペクトル， B は磁化のフラクタルパラメータ， z_t は磁性体の上面深度， Δz は磁性体の厚さ， C は磁場定数である。式 (1) は独立変数 k とその関連した従属変数 $\Phi(k)$ を結びつけている。また，このモデルは 4 つのパラメータ ($\beta, z_t, \Delta z, C$) において非線形であるが，その他の点では任意である。キュリー点深度は最適化アルゴリズムを適用して，計算値とモデルの残差の二乗和が最小となる ($\beta, z_t, \Delta z, C$) を推定したのち， $z_t + \Delta z$ で求められる。

3. 対象地域と解析データ

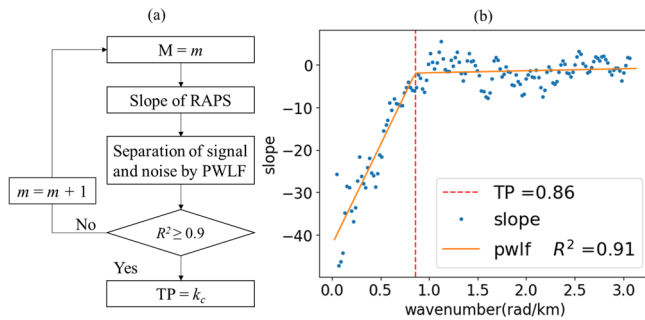
本研究では，ブリテン諸島を含む (10.8°W, 49.5°N) - (2°E, 59°N) の領域を対象に選んだ。この地域は Mather and Fulla (2019) と同じ調査地域である。使用データは NOAA が公開している地球磁気異常グリッド EMAG2v3 の Upward Continued, 標高グリッドとして ETOPO2022 の 60 秒角 bedrock, また，IHFC が公開している地表の熱流量データである (第 1 図)。ブリテン諸島を覆うように 20 km 間隔で計 3233 個の格子点を作成し，各格子点を中心にスペクトル解析を行った。ウィンドウサイズは 300 × 300 km²，データ間隔は 1 km とした。



第 1 図 対象地域の (a) 標高データ。 (b) 磁気異常と熱流量。



第2図 RAPSの(a)概略図と(b)対象地域の統計結果。



第3図 ノイズ除去アルゴリズム (a) フローチャート (b) 区分線形関数による回帰分析の例。

4. ノイズ除去アルゴリズム

4.1 実測値を扱う際のノイズ

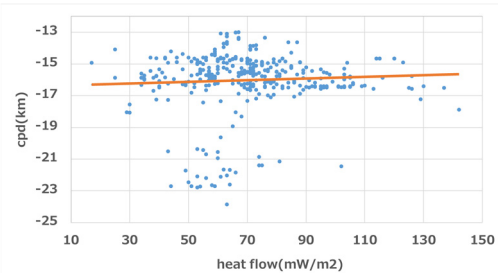
Bouligand *et al.* (2009) のモデルの特徴はウィンドウサイズとデータ間隔によって決定される波数範囲の全てのデータを使用してパラメータが推定されることである。しかし、実測値を扱う際、統計モデルにおいてすべてのデータが望ましい値であるとは限らない。RAPSは第2図(a)のように3つに区分することができ、モデルに不適切な地表付近のデータやスペクトル解析処理によるノイズが高波数域に存在する。また、ノイズは平均スペクトルが一定のホワイトノイズであらわされるため、変化が小さいという特徴がある(Zeng *et al.*, 2020)。実際にブリテン諸島の全地点でのRAPSに対する各波数ごとの統計結果も同じく、高波数域で変化が小さい特徴がみられた(第2図(b))。また、最適化アルゴリズムを適用し、推定した結果、上面深度 z_c がブリテン諸島全域で負の値を示した。上面深度はRAPSの高波数域に強く影響されるため(Bouligand *et al.*, 2009)、高波数域のノイズが強く影響していると考えられる。本研究ではこれらのノイズを除去する低域フィルタ処理を行った。

4.2 区分線形関数を用いた低域フィルタ処理

RAPSに低域フィルタ処理を行うため、しきい値を決定する必要がある。第2図(a)のSecond breakをしきい値として決定することが望ましいが、磁性体モデルとノイズが混在しており、明確な区分をすることが難しい。そこで本研究ではRAPSの傾きに注目し、区分線形関数を用いたしきい値 k_c を決定する反復アルゴリズムを作成した(第3図(a))。このアルゴリズムは m 回目に、RAPSを1点ずつずらしながら $2m+1$ 点の区間で分割し、各区間の回帰直線の傾きを求める。次に、傾きに対して2つの線分で構成される区分線形関数による回帰分析を行う(第3図(b))。区分線形回帰における決定係数が0.9以上の条件を満たしたとき、区分線形関数の線分の転換点をしきい値として決定し、低域フィルタ処理を行う。ノイズ除去後のRAPSに最適化アルゴリズムを適用し、最良なパラメータ ($\beta, z_b, \Delta z, C$) を推定した。

第1表 従来のプログラムと本研究の上面深度 z_c (km)の統計結果

	Traditional Program	This study
count	3233	3233
mean	-1.01	4.22
max	0.05	8.15
min	-1.98	0.78
std	0.40	0.95



第4図 熱流量 (mW/m²) とキュリー点深度 (km) の相関図。

5. 結果

5.1 磁性体の上面深度 z_t

実装したアルゴリズムを適用したところ、磁性体の上面深度がブリテン諸島全域で正の値を示した。また、本研究結果は従来のプログラム結果よりも上面深度のばらつきが大きい。これは従来のプログラムでは、ノイズが最適化アルゴリズムの適用に対して影響を与えているためと考えられる。

5.2 熱流量とキュリー点深度の比較

キュリー点深度 Z_b は次の式を用いて熱流量 q と関連付けることができる (Hsieh *et al.*, 2014)。

$$q = \lambda(dT/dZ) = \lambda(580^\circ\text{C}/Z_b) \quad (2)$$

ここで、 λ は熱伝導率、 dT/dZ は温度勾配である。本研究で推定した地表を基準とするキュリー点深度と地表の熱流量との相関係数は0.011であった。

6. おわりに

本研究では、区分線形関数を用いてキュリー点深度推定におけるノイズ除去アルゴリズムを実装し、推定を行った。その結果、上面深度の結果が改善された。しかし、熱流量との相関がみられなかった。今後、統計モデルを適用する際、より実用的なRAPSの波数範囲の制約条件が求められると考える。

文 献

- Bouligand C., Glen J.M.G., and Blakely R.J. (2009) Mapping Curie temperature depth in the western United States with a fractal model for crustal magnetization. *Journal of Geophysical Research*, 114, 1-25.
- Hsieh H.H., Chen C.H., and Yen H.Y. (2014) Curie point depth from spectral analysis of magnetic data in Taiwan. *Journal of Asian Earth Science*, 90, 26-33.
- Mather B. and Fullea J. (2019) Constraining the geotherm beneath the British Isles from bayesian inversion of curie depth: integrated modeling of magnetic, geothermal, and seismic data. *Solid Earth*, 10, 839-850.
- Zeng X., Li X., Liu J., and Niu C. (2020) Simultaneous potential field data interpolation, border padding, and denoising via projection onto convex sets algorithm. *Journal of Applied Geophysics*, 175, 103983, 1-10.

iRIC-ELIMO および Nay2DFlood ソルバーを使用した 津波浸水シミュレーション：宮城県北上川の事例

末安 史弥*・根本 達也*・ベンカテッシュ ラガワン*

Simulation of Tsunami Inundation using iRIC-ELIMO and Nay2DFlood Solvers: Case Study of Kitakami River, Miyagi Prefecture

Fumiya SUEYSU*, Tatsuya NEMOTO* and Venkatesh RAGHAVAN*

*大阪公立大学大学院理学研究科地球学専攻 Department of Geosciences, Graduate school of science, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-5858, Japan.
E-mail: se23912w@st.omu.ac.jp

キーワード：津波，浸水，iRIC-ELIMO，Nays2DFlood，北上川

Key words：Tsunami, Inundation, iRIC-ELIMO, Nays2DFlood, Kitakami River

1. はじめに

日本ではこれまでに数多くの地震が起こっており，甚大な被害を引き起こした例も少なくない．地震による被害は地震動によるものだけでなく，海域で発生した津波によるものも大きい．津波は陸域へ伝播し，遡上，浸水被害をもたらすことがある．

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波は，沿岸域のみならず海岸から離れた沿川地域にも大きな被害をもたらした．津波が遡上した宮城県石巻市北上川では，湾内や河口付近での津波水位データが欠損しており，解析が難しく，津波の波高と遡上による浸水の関係を考慮した研究が少ない．

本研究では，東北地方太平洋沖地震を対象として，追波湾における津波の発生，伝播および北上川河口付近での遡上，浸水のシミュレーションを行った．また，実測値との比較を行い，評価した．

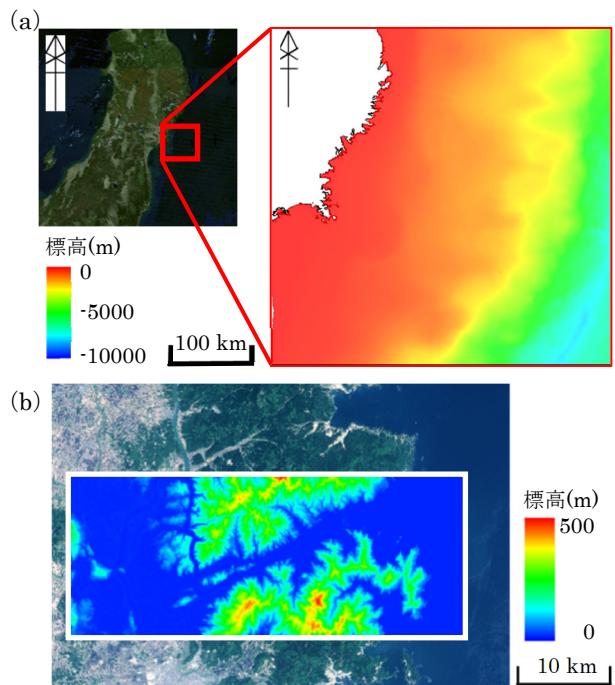
2. 津波伝播の解析手法

津波計算には，iRIC のソルバーの一つである ELIMO (Easy Performable Long-wave Inundation Model) を用いた．ELIMO は，矩形断層モデルによる海底変位情報から，津波の発生，伝播を計算する．

本解析ソルバーに採用されている津波の支配方程式は，球面座標による水深積分型運動方程式である．ここで，汀線不透過条件は，汀線に仮想的な不透過壁を与えることで津波の波高を求めることができる．

津波の初期水位は，二つの断層からなる矩形断層モデル (国土地理院，2011) により計算した (第1表)．

海底地形データとして日本海洋データセンターの日本近海域 500 mメッシュデータを使用し，解析対象地域は東経 141 度から 144 度，北緯 37 度から 40 度とした (第1図 (a))．津波発生からの計算時間は，有意な波高が確認できた範囲の 9000 秒間とした．



第1図 解析地域

(a) 津波伝播計算の対象地域，(b) 津波遡上計算の対象地域

第1表 使用した断層パラメータ

	緯度	経度	断層長さ	断層幅	すべり距離	すべり角	走向	傾斜角	断層深さ
断層1	38.80 度	144.00 度	186 km	129 km	24.7 m	101 度	203 度	16 度	41.4 km
断層2	37.33 度	142.80 度	194 km	88 km	6.1 m	83 度	203 度	15 度	40.4 km

3. 津波遡上・浸水の解析手法

津波遡上・浸水解析には、iRIC の汎用解析ソルバーである Nays2DFlood を用いた。Nays2DFlood は一般曲線座標で境界適合座標を用いた非定常平面二次元流計算で行われ、動的に浸水域を求めることができる。解析地域は、北上川の沿川を対象とした（第 1 図 (b)）。本解析には、地形と津波の波高データおよび波が遡上した際の抵抗量を示す粗度係数が必要である。地形データには SRTM (Shuttle Rader Topography Mission) GL3 (90 m) を使用し、波高データには、ELIMO の北上川河口における結果を用いた。小谷ほか (1998) を参考に粗度係数を設定した。

4. 評価方法

津波浸水結果の評価は、相田 (1977) による幾何平均 K および幾何標準偏差 κ を用いた。この指標は、地点ごとの痕跡高と計算水位の比を用いて、以下の式 (1), (2) で表される。これは、津波痕跡高と計算水位の適合度を示すものである。

$$\log_{10} K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_{10} K_i \quad (1)$$

$$\log_{10} \kappa = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\log_{10} K_i)^2 - n(\log_{10} K)^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで、 $K_i = O_i / C_i$ 、 n : 地点数、 O_i : i 番目の地点での津波痕跡高、 C_i : i 番目の地点での計算水位である。幾何平均 K は、波源で想定された津波全エネルギー量の妥当性を表わす。幾何標準偏差 κ は、地形データの誤差、解析上の誤差等を複雑に反映したものである。土木学会 (2002) によると、再現性の良好な範囲は $0.95 < K < 1.05$ 、および $\kappa < 1.45$ とされている。

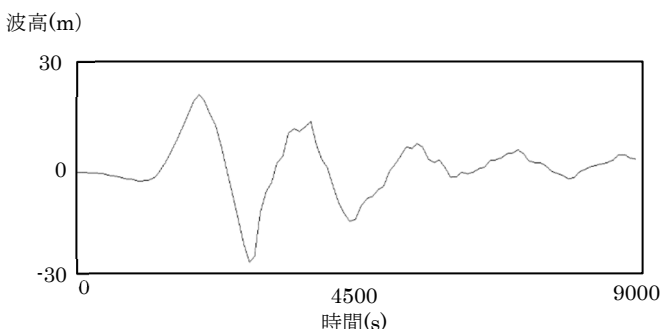
5. シミュレーションの結果

5.1 津波伝播の解析

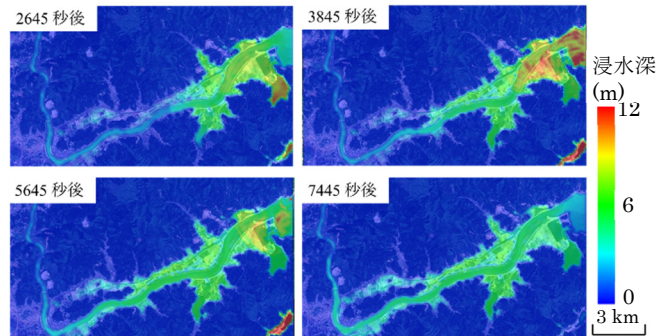
ELIMO の津波シミュレーションの結果、北上川河口における津波第 1 波の到達時刻は、津波発生から 1445 秒後であった。計算終了時間の 9000 秒までに 5 回の波が押し寄せていることがわかる。北上川河口における最大波高は 20.6 m であった。(第 2 図)。

5.2 津波遡上・浸水域の解析

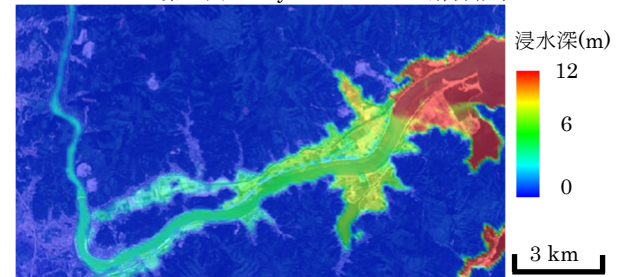
Nays2DFlood の計算結果から得られた浸水深の変化を第 3 図に示す。河口付近で約 12 m の波高が確認でき、遡上域は時間が経過するにつれて河川を中心にして拡大していることがわかる。津波発生から 5645 秒まで、波が到達しており、7445 秒以降は浸水域における水位上昇は確認できなかった。



第 2 図 北上川河口地点での津波波高データ



第 3 図 Nays2DFlood での解析結果



第 4 図 最大浸水深

6. シミュレーションの評価

相田 (1977) の指標により再現性の評価を行った。計算水位は Nays2DFlood の計算結果の最大浸水深を用いた (第 4 図)。津波痕跡高データは、津波痕跡データベース (東北大学, 2010) より解析対象範囲内で信頼度 A のデータ (28 地点) を用いた。 K は 0.9533、 κ は 1.3234 であり、本研究のシミュレーションは、北上川河口域において、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波を良好に再現したといえる。

7. おわりに

本研究では 2011 年東北地方太平洋沖地震による津波を、矩形断面モデルと海底地形データを用いて計算し、津波伝播シミュレーションを行った。シミュレーションの結果と陸域の地形データから、宮城県北上川河口での津波遡上・浸水域の計算を行い、相田 (1977) の指標のもと評価を行った。その結果、良好な再現度の津波浸水シミュレーションを実現できた。しかし、一連のシミュレーションにおいて、津波計算と遡上解析を分割して行っており、海域から陸域にかけての津波エネルギー量の伝播等も考慮したシミュレーションを検討する必要がある。また、使用する海底及び陸域の地形データの高解像度化を検討する必要がある。

文 献

- 相田勇 (1977) 三陸沖の古い津波のシミュレーション. 地震研究所彙報, vol.52, pp.71-101.
- 土木学会原子力土木委員会 津波評価部会 (2002) 原始力発電所の津波評価技術. 66p.
- 国土交通省国土地理院地殻変動研究室 (2011) 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル <https://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html>. (2022/9/23 閲覧)
- 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫 (1998) GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法. 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.356-360.
- 東北大学災害科学国際研究所 (2010) 津波痕跡データベース <https://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp>. (2023/5/5 閲覧)

マルチエージェントシステムによる津波避難シミュレーション

根本 達也*・佐藤 葵**・ベンカテッシュ ラガワン*

Tsunami Evacuation Simulation using Multi-Agent System

Tatsuya NEMOTO*, Aoi SATO** and Venkatesh RAGHAVAN*

* 大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan. E-mail: tmemoto@omu.ac.jp

** 大阪市立大学理学部 Faculty of Science, Osaka City University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan.

キーワード: 避難シミュレーション, マルチエージェントシステム, ダイクストラ法, 経路探索
Key words: Evacuation simulation, Multi-agent system, Dijkstra's algorithm, Path search

1. はじめに

近年, 日本では災害による未曾有の被害が発生している。とくに 2011 年 3 月の東日本大震災では, 津波による大規模な被害が発生した。また, 近々起こるといわれている南海トラフ大地震でも, 津波による大きな被害が予想されている。このような背景から, マルチエージェントシステム (Multi-Agent System: MAS) を用いた津波避難シミュレーションに関する研究が行われている (齋藤・鏡味, 2005; 小坂ほか, 2017 など)。シミュレーションによって避難に対する問題や課題等を明らかにすることは, 被害減少のために重要である。

本研究では, 小坂ほか (2017) などを参考にして, 石川県輪島市臨港地域を対象に MAS によるシミュレーションモデルを作成した。モデルの概要とシミュレーションの結果を紹介する。

2. マルチエージェント・シミュレーション

複数のエージェントを用いた仮想実験をマルチエージェント・シミュレーションという。エージェントは一定のルールのもとで状況に応じて自律的に行動する。津波避難シミュレーションにおいて, エージェントは避難者であり, 避難者は交差点と道路で構成される道路ネットワーク上を移動する。

3. シミュレーションモデルの作成

本研究では, (株)構造計画研究所の artisoc4 を用いてシミュレーションモデルを作成した。このソフトウェアは MAS に特化したシミュレーションプラットフォームであり, GUI によるエージェントの種類・型の定義や, Visual Basic ライクなコンピュータ言語による行動ルールの作成が可能である。

3.1 対象地域

石川県輪島市臨港地域の東西 4 km×南北 4 km の範囲を津波避難シミュレーションの対象とし, 12 箇所の指定緊急避難場所をエージェントの目的地に設定した (第 1 図)。

3.2 道路ネットワークの作成

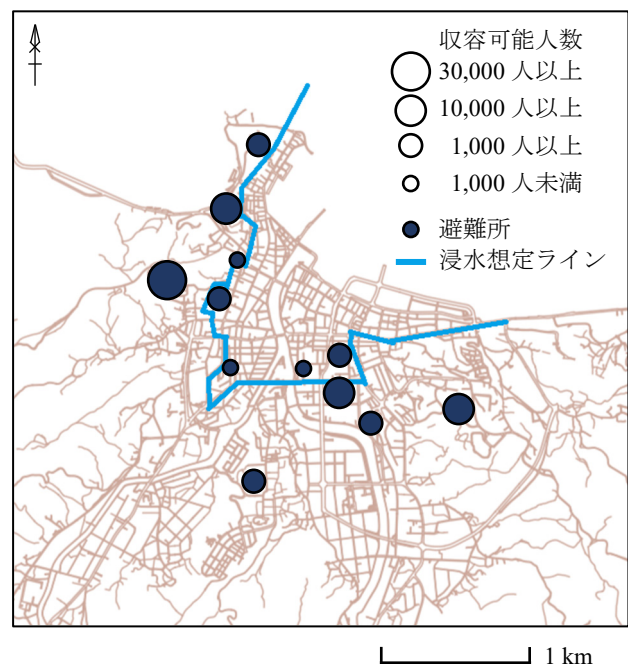
道路ネットワークはノード (交差点) とそれらを結ぶリン

ク (道路) からなる。リンクには幅員情報をもたせることができる。本研究では OpenStreetMap から道路ネットワークデータを作成した。

3.3 エージェントの設定

エージェントの属性を男性, 女性, 観光客の 3 種類とし, 小坂ほか (2017) に基づき, それぞれの避難速度を 1.30 m/s, 1.25 m/s, 1.14 m/s に設定した。また, 平日昼間の避難を想定し, エージェントの総数を平成 24 年の輪島市の人口と観光客数から 12,456 人とした。エージェントの属性, 速度, 人数は容易に追加・変更できる。

町ごとの面積や建物数を考慮して, エージェントを均等に配置した。エージェントは避難場所の位置を認知しているという条件のもとで, 避難場所までの最短経路を移動する。最短経路の計算にはダイクストラ法を用いた。



第 1 図 対象地域と指定緊急避難場所。



第2図 シミュレーション結果の例 (一部を拡大して表示)。

4. 結果

第2図にエージェントの初期配置とシミュレーション開始から300秒後、600秒後、900秒後の避難状況を示す。シミュレーションの結果、2028秒後にすべてのエージェント12,456人が避難を完了した。300秒後、600秒後、900秒後の避難完了者数は、それぞれ6,976人、11,153人、11,760人であり、約600秒でエージェントの9割が避難を完了した。

5. おわりに

石川県輪島市臨港地域を対象に、artisoc4を用いてMASによる津波避難シミュレーションモデルを作成した。本研究では、エージェントの属性を単純に住民の性別と観光客

で区分したが、年齢等で細分する必要がある。また、道路の幅員情報を用いて混雑による渋滞の発生を組み込んだり、時間帯や気候条件、道路の勾配等による移動速度の変化を反映したりする必要がある。

文 献

小坂陽介・野村尚樹・大藤愛子・宮島昌克(2017)マルチエージェントシステムを用いた津波避難に関する解析-輪島市臨港地域を対象とした事例研究-。土木学会論文集A1(構造・地震工学), vol.73, no.4, pp.I_1010-I_1017.
 齋藤崇・鏡味洋史(2005)マルチエージェントシステムを用いた津波からの避難シミュレーション-奥尻島青苗地区を例として-。日本建築学会計画系論文集, vol.70, no.597, pp.229-234.

第34回日本情報地質学会講演会

講演要旨集

2023年6月11日 発行

発行 日本情報地質学会
〒225-0003 横浜市青葉区新石川3-22-1
国学院大学 人間開発学部内
